



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁRSKA PRÁCA

Radovan Lascsák

**Simulácia odstránenia
kozmickeho odpadu
pomocou aerodynamického odporu**

Astronomický ústav UK (101. • 32-AUUK)

Vedúci bakalárskej práce: RNDr. Pavel Koteň, Ph.D.

Študijní program: Fyzika (B0533A110001)

Študijní obor: Fyzika

Praha 2023

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne a výhradne s použitím citovaných prameňov, literatúry a ďalších odborných zdrojov. Táto práca nebola využitá k získaniu iného alebo rovnakého titulu.

Beriem na vedomie, že sa na moju prácu vzťahujú práva a povinnosti vyplývajúce zo zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platnom znení, hlavne skutočnosť, že Univerzita Karlova má právo na uzavrenie licenčnej zmluvy o použití tejto práce ako školného diela podľa §60 odst. 1 autorského zákona.

V dňa

Podpis autora

Chcel by som sa poďakovať môjmu vedúcemu Pavlovi Kotenovi za umožnenie písania práce na túto tému a pomoc pri jej tvorbe. Ďalej ďakujem Samuelovi Amrichovi, Jiřímu Šilhovi, Davidu Vokrouhlickému a Aleši Bezděkovi za konzultácie myšlienky v jej rannom štádiu. Taktiež ďakujem Petrovi Kaňukovi a Rudolfovi Gálišovi, ktorí mi dali základné astronomické vzdelanie. V neposlednom rade ďakujem mojim rodičom a sestre za neustálu podporu a pripomínanie termínu odovzdania práce.

Názov práce: Simulácia odstránenia kozmického odpadu
pomocou aerodynamického odporu

Autor: Radovan Lascsák

Ústav: Astronomický ústav UK (101. • 32-AUUK)

Vedúci bakalárskej práce: RNDr. Pavel Koteň, Ph.D., Astronomický ústav AV
ČR, v.v.i. (32-AUAV)

Abstrakt: Množstvo kozmického odpadu na obežnej dráhe narastá a začínajú sa podnikať rôzne iniciatívy na jeho kontrolu. V tejto práci predstavíme aktívnu metódu odstraňovania kozmického odpadu o veľkosti 1 cm. Založená je na vytvorení malého oblaku prachových častíc priamo vo vesmíre. Cieľom je trafiť odpad vo vysokej relatívnej rýchlosti, čím dôjde ku spomaleniu odpadu vďaka odporovej sile. Tým vieme zredukovať dobu života odpadu na orbite zo stoviek rokov na menej ako 25 rokov. Odhadujeme, že so zásobou 100 kg prachových častíc by bolo možné odstrániť vyše tisíc kusov odpadu.

Kľúčové slová: kozmický odpad, aktívne odstraňovanie odpadu, čistý vesmír

Title: Simulation of space debris removal by aerodynamic drag

Author: Radovan Lascsák

Institute: Astronomical institute UK (101. • 32-AUUK)

Supervisor: RNDr. Pavel Koteň, Ph.D., Astronomical institute AV ČR, v.v.i. (32-AUAV)

Abstract: The amount of space debris in orbit is increasing, and various initiatives are being undertaken to control it. In this paper, we present an active method of removing space debris that is 1 cm in size. It is based on creating a small cloud of dust particles directly in space. The goal is to hit the debris at a high relative velocity, which will slow it down due to the drag force. That allows us to reduce the debris' orbital lifetime from hundreds of years to less than 25 years. We estimate that with a supply of 100 kg dust particles, it would be possible to remove over a thousand pieces of debris.

Keywords: space debris, active debris removal, clean space

Obsah

Úvod	2
1 Kozmický odpad	3
1.1 Rozdelenie kozmického odpadu	3
1.2 Problém kozmického odpadu	3
1.3 Odstraňovanie kozmického odpadu	5
2 Lokálna metóda aerodynamického odporu	6
3 Fáza 1: Stabilita oblaku	7
3.1 Teoretický model	7
3.2 Simulácia	8
3.3 Typy oblakov	11
4 Fáza 2: Spomalenie odpadu pri prelete oblakom	14
4.1 Teoretický model	14
4.2 Výpočet	15
5 Fáza 3: Zhorenie odpadu v atmosfére	19
5.1 Teoretický model	19
5.2 Simulácia	19
6 Diskusia	21
Záver	23
Bibliografia	25
Zoznam obrázkov	26
Zoznam tabuliek	28
A Prílohy	30
A.1	30
A.2	31
A.3	32
A.4	32
A.5	32
A.6	32
A.7	33
A.8	35

Úvod

Na obežnú dráhu Zeme sa vypúšťajú tisíce satelitov, ktoré následne ostávajú na orbite stovky rokov. Pri ich zrážkach vzniká veľké množstvo malých úlomkov. Čím viac úlomkov je vo vesmíre, tým viac je aj zrážok, a tým viac je úlomkov. Tento kruhový efekt by mohol v budúcnosti viesť ku kompletnému zablokovaniu niektorých zemských orbít. Kozmický odpad a problém s ním spojený je podrobnejšie rozobraný v kapitole 1.

V súčasnosti sa problém kozmického odpadu rieši pasívnymi metódami, ktoré zaručujú odstránenie satelitu z orbity do 25 rokov od skončenia misie. Avšak problém predstavuje aj odpad, ktorý sa už vo vesmíre nachádza. Na jeho odstránenie sa navrhuje viacero aktívnych metód, ktoré sú podrobnejšie rozobrané v sekcii 1.3. Väčšinou sú však tieto metódy zamerané na celé satelity alebo sú príliš neefektívne a cenovo náročné.

Cieľom tejto práce je navrhnúť (kapitola 2) a preskúmať (kapitoly 3 až 6) efektívnu metódu odstraňovania odpadu o veľkosti ~ 1 cm. Takýto odpad je stále hrozbou pre satelity, pretože ich dokáže vyradiť z prevádzky. Rovnako predstavuje hrozbu aj pre astronautov vo voľnom vesmíre.

Naša metóda je založená na brzdení odpadu pri prelete oblakom prachových častíc, ktorý je vytvorený priamo na orbite lokálne pre daný odpad. Kľúčová je vysoká relatívna rýchlosť odpadu a oblaku, ktorá je zabezpečená opačnými smermi pohybu na orbite. Skúmali sme rozpínanie oblaku častíc vo vákuu (kapitola 3), zmenu rýchlosti odpadu po prelete oblakom (kapitola 4) a skrátenie doby života odpadu na orbite (kapitola 5).

Problémom sa venujeme iba v teoretickej rovine, nezaoberáme sa návrhom satelitu a misie. Uvedomujeme si, že náš návrh je technologicky značne náročný, a je možné, že bude uskutočniteľný až o niekoľko rokov.

1. Kozmický odpad

V dnešnej dobe sa na obežnej dráhe Zeme nachádza asi milión nepoužiteľných, ľuďmi vyrobených, objektov väčších ako 1 cm ¹. Tento kozmický odpad predstavuje hrozbu pre súčasné a budúce satelity ako aj astronautov. Preto sa začínajú intenzívne podnikať kroky vedúce k jeho kontrole či redukcii.

1.1 Rozdelenie kozmického odpadu

Základné rozdelenie kozmického odpadu je podľa jeho veľkosti. S každou kategóriou sa spájajú iné riziká. Vďaka kolíznym rýchlostiam v ráde kilometrov za sekundu, dokážu objekty nad 10 cm (ozn. ako veľké) zničiť celý satelit pričom vznikne mnoho úlomkov. Objekty v ráde centimetra (ozn. ako stredné) vedú poškodiť satelit natolko, že nad ním stratíme kontrolu. Stáva sa tak z neho potenciálna hrozba pre ostatné satelity, či terč pre úlomky, ktorý je neschopný úhybného manévru. Najmenšie častice odpadu (menšie ako 1 mm, ozn. malé) spôsobujú postupnú degradáciu povrchu a nekrytých prístrojov satelitov (National Research Council 1995).

Pod kozmický odpad zaraďujeme: nefunkčné satelity, časti rakiet/satelitov odhodených pri misii, stupne nosných rakiet a úlomky, ktoré vznikli pri kolízii alebo rozpadom rakety/satelitu. Na orbite sa dokopy nachádza asi 32 tisíc objektov väčších ako 10 cm, z čoho funkčné satelity tvoria menej ako štvrtinu.

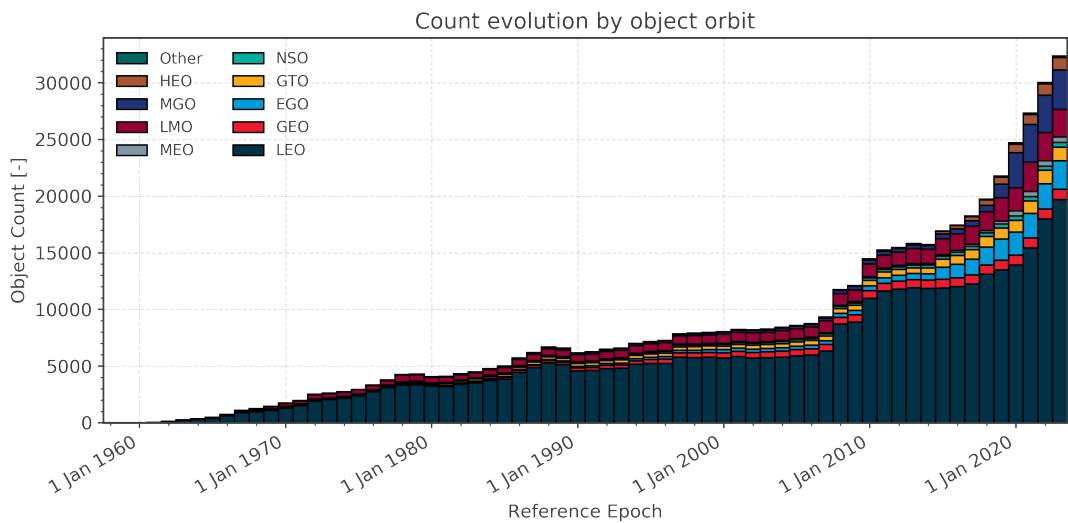
Kozmický odpad vieme rozdeliť aj podľa orbity, na ktorej obieha okolo Zeme. Z grafu 1.1 vidíme, že najväčší počet objektov sa nachádza na nízkej zemskej orbite (LEO). Patria sem objekty, ktoré majú perigeum aj apogeum vo výške menej ako 2000 km nad povrchom Zeme (ESA 2022).

1.2 Problém kozmického odpadu

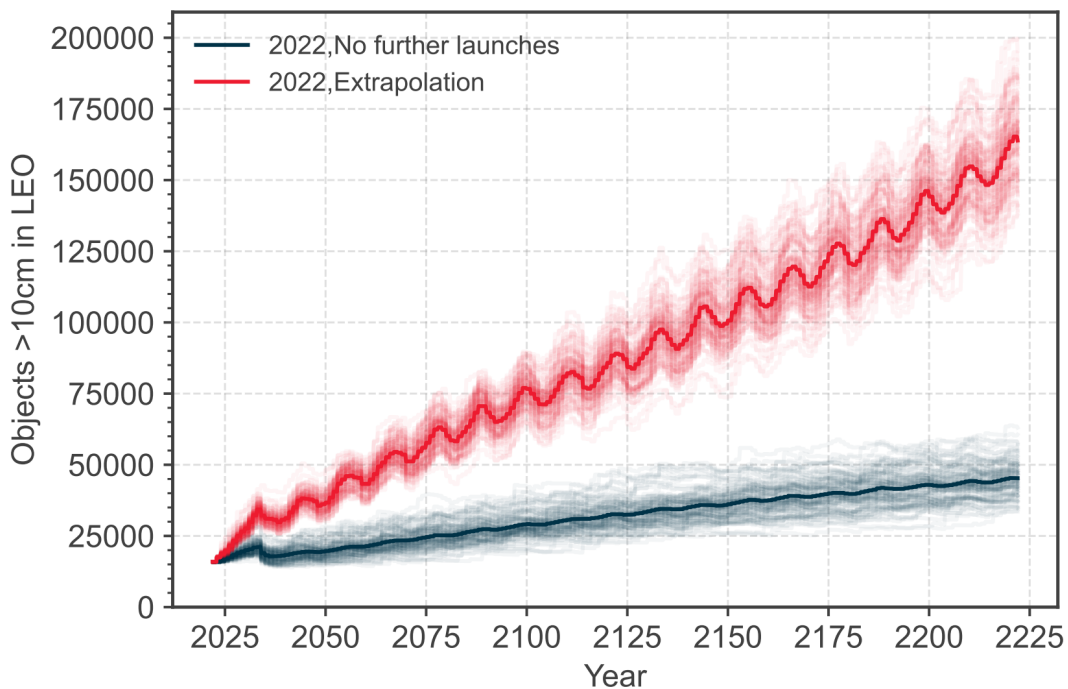
Atmosféra Zeme zabezpečuje prirodzené brzdenie objektov na LEO. Podľa regulácií ESA by mali satelity opustiť obežnú dráhu do 25 rokov po ukončení misie (ESA 2022). Podľa grafu v prílohe A.2 to je splnené pre veľké satelity do výšky 500 km až 660 km. Satelity, ktoré sa aktuálne nachádzajú vo výške nad 800 km ostanú na orbite stovky rokov. Stredne veľký kozmický odpad (rádovo centimeter) padá k Zemi rýchlejšie. Hranica 25 rokov je pre hliníkovú guľu o priemeru 1 cm splnená do výšky 620 km až 840 km. Vo výške ~ 1000 km ostáva stredne veľký odpad na orbite stovky rokov.

Odpad, ktorý klesá k Zemi pomaly, sa hromadí na obežnej dráhe. Vypúšťaním nových satelitov sa počet objektov na obežnej dráhe zvyšuje, graf 1.1. Na grafe 1.2 je zobrazená predpoveď počtu veľkého kozmického odpadu (nad 10 cm) na najbližších 200 rokov na LEO. Všimnime si, že množstvo odpadu bude rásť, aj keby už neboli vypustené žiadne ďalšie satelity. To je z dôvodu takzvaného Kesslerovho syndrómu (Kessler a Cour-Palais 1978). Odpad, ktorý nevieme kontrolovať spôsobuje zrážky, pri ktorých vzniká ďalší nekontrolovateľný odpad. To môže eventuálne v budúcnosti spôsobiť kompletne zablokovanie istých orbít Zeme.

¹Prevzaté 15.03.2023 z <https://sdup.esoc.esa.int/discosweb/statistics>



Obr. 1.1: Vývoj počtu objektov väčších ako 10 cm na obežnej dráhe Zeme podľa ich orbity (ESA 2022). Definície skratiek v legende sú uvedené v prílohe A.1.



Obr. 1.2: Predpoveď počtu objektov nad 10 cm na LEO v najbližších 200 rokoch. Červená krivka znázorňuje extrapolovanú situáciu pri súčasnom trende vypúšťania satelitov. Čierna krivka znázorňuje hypotetickú situáciu, ak by už neboli žiadne ďalšie štarty do vesmíru (ESA 2022)

1.3 Odstraňovanie kozmického odpadu

V súčasnej dobe sa kladie dôraz na to, aby novo vypustené satelity spĺňali regulácie ESA a opustili LEO do 25 rokov (ESA 2022). Jednou z možností je namontovanie padáku na satelit, ktorý sa roztvorí po skončení misie. Padák zvýši atmosférický odpor, čo vie radikálne znížiť dobu života satelitu na orbite. Táto a podobné metódy odstraňovania kozmického odpadu sa nazývajú pasívne. Avšak ako aktívne odstrániť objekty, ktoré sa na orbite už nachádzajú a budú sa nachádzať ďalšie stovky až tisícky rokov?

Je viac metód ako odstraňovať kozmický odpad aktívne. Základná myšlienka spočíva v zmene dráhy objektu tak, aby sa vnoril do hlbších častí atmosféry, kde je silnejší atmosférický odpor. Postupným špirálovým klesaním nakoniec zhorí, respektíve spadne na povrch Zeme. Najväčšia pozornosť sa venuje veľkému kozmickému odpadu, t. j. nefunkčným satelitom, keďže tie (ako sme písali v sekcii 1.2) zostávajú na orbite najdlhšiu dobu.

V tejto práci sa však budeme venovať odstraňovaniu stredne veľkého kozmického odpadu (v ráde centimetra), pre ktorý sa navrhujú tri hlavné metódy aktívneho odstraňovania (Mark a Kamath 2019):

1. Ablácia laserom

Spočíva vo vynesení silného laseru do vesmíru, ktorý dokáže vypariť malý kozmický odpad (<1 mm) cestujúci veľkou relatívnou rýchlosťou. Problém nastáva pri objektoch v ráde centimetra, kedy je metóda príliš energeticky náročná. Uvažuje sa aj o použití pozemských laserov, ktoré sú však, kvôli presnosti, použiteľné len pre väčšie objekty.

2. Iontový paprsok

Spočíva v urýchlení iontov na vysoké rýchlosti, kedy držia pokope v paprsku. Ten je vyslaný satelitom, ktorý sa nachádza nad objektom, a tak zatlačí objekt dole smerom k Zemi. Tým ho posunie na dráhu s väčšou excentricitou, ktorá sa vnára hlbšie do atmosféry, čím sa doba života objektu na orbite zníži. Problémom metódy je neefektivita prenosu hybnosti a nestabilita satelitu.

3. Orbitálny oblak prachu

Spočíva vo vytvorení obrovského oblaku prachu okolo celej Zeme v istých výškach nad povrchom. Takto by sa zvýšil atmosférický odpor, a tým by sa znížila doba života kozmického odpadu. Problémom je cenová náročnosť vytvorenia takéhoto oblaku a jeho ďalšia kontrola.

V tejto práci predstavíme novú metódu, ktorá kombinuje idey z týchto troch metód a snaží sa vyriešiť ich problémy. Nazvali sme ju Lokálna metóda aerodynamického odporu (LMAO).

2. Lokálna metóda aerodynamického odporu

LMAO je založená na metóde orbitálneho oblaku prachu zo sekcie 1.3. Rozdiel je však v tom, že tento oblak nemá orbitálne rozmery, ale je vytvorený lokálne pre daný objekt. Prachové častice o veľkosti rádovo 1 mikrón spôsobujú aerodynamický odpor a spomaľujú odpad letiaci skrz ne natoľko, aby zhorel v atmosfére do 25 rokov. LMAO sa zameriava na odpad o veľkosti ~ 1 cm, teda stredne veľký odpad (viď. sekcia 1.1). Kľúčové je, aby odpad a častice oblaku kolidovali vo vysokej relatívnej rýchlosti. Tak môže byť dosiahnutá čo najvyššia zmena rýchlosti.

Predpoklad LMAO je vypustenie satelitu (budeme ho volať LMAOSAT) a jeho blízky stret so stredne veľkým kozmickým odpadom obiehajúcim okolo Zeme v opačnom smere. V takomto prípade stačí vypustiť z LMAOSATu oblak častíc malou rýchlosťou (ktorá je zanedbateľná s obehovou), a stále je dosiahnutá obrovská relatívna rýchlosť objektu a oblaku. Podľa (Vance a Mense 2013), stredná relatívna rýchlosť satelitu a objektu o priemere 0.5 cm vo výške 880 km je 13 km s^{-1} (na heliosynchrónnej dráhe).

Zameriame sa primárne na orbity vo výške 900 km až 1000 km, keďže doba života stredne veľkého odpadu narastá v týchto výškach na stovky rokov, a zároveň sa tu vyskytuje veľa iných objektov, pre ktoré by mohol byť odpad hrozbou.

Preskúmame tri hlavné fázy LMAO:

1. fáza: Stabilita oblaku

Ako sa bude vyvíjať hustota oblaku medzi jeho vznikom a stretom s odpadom? Aká je vhodná hmotnosť prachových častíc a počiatočná veľkosť oblaku?

2. fáza: Spomalenie objektu

Na základe profilu hustoty oblaku, ako veľmi sa zmenší rýchlosť odpadu po prelete oblakom v závislosti na vzdialenosti jeho dráhy od stredu oblaku?

3. fáza: Redukcia životnosti objektu

Na základe zmeny rýchlosti objektu a jeho pôvodnej dráhy, o koľko rokov skôr zhorí objekt v atmosfére Zeme? Aká je minimálna zmena rýchlosti potrebná na to, aby sa doba života zmenšila na menej ako 25 rokov?

Samozrejme, stretávame sa s problémom technickej realizácie metódy. Oblakom potrebujeme trafiť centimetrový objekt vo vysokej rýchlosti. Potrebná hmotnosť oblaku sa odvíja od toho ako presne vieme určiť relatívnu dráhu objektu voči LMAOSATu. Čím presnejšie to dokážeme, tým menší a menej hmotný oblak potrebujeme, a tým lacnejšie je odstránenie jedného objektu.

Problémom je, že na objekty o veľkosti ~ 1 cm vplýva viacero slabých efektov, ktoré narúšajú ich dráhu. Preto nepoznáme dráhy objektov pod 10 cm dostatočne presne. Ak chceme presnosť navýšiť, tak potrebujeme upresniť dráhu priamo vo vesmíre (pomocou laserového skeneru, či infračervenej kamery). V kombinácii s obrovskou relatívnou rýchlosťou 13 km s^{-1} to znamená, že relevantná doba medzi vytvorením oblaku a preletom odpadu cez neho je v ráde sekúnd, maximálne desiatok sekúnd.

3. Fáza 1: Stabilita oblaku

Cielom tejto kapitoly je preskúmanie rozpínania oblaku prachových častíc vo vákuu. Definovali sme štyri hlavné typy oblakov, všeobecne popísali ich správanie pomocou rôznych parametrov a špecifikovali triedu oblakov, ktorou sa budeme zaoberať ďalej.

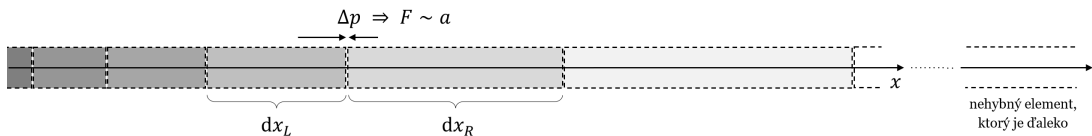
3.1 Teoretický model

Pre jednoduchosť predpokladajme, že oblak má tvar kocky a jeho rozpínanie sa dá rozložiť na tri jednorozmerné (1D) rozpínania pozdĺž osí x, y, z . Oblak o pološírke r sme rozdelili na homogénne elementy s veľkosťou dx . V priebehu simulácie si elementy zachovávajú počet častíc dN a hmotnosť dm . Ich správanie je modelované ako ideálny plyn (Callen 1985), ktorý spĺňa

$$p dV = kT dN, \tag{3.1}$$

kde p je tlak, dV objem elementu, k Boltzmannova konštanta a T kinetická teplota častíc. Objem elementu je $dV = dS dx$, kde dS je pričná plocha elementov. Kvôli rozpínaniu v ostatných dimenziách sa dS mení, avšak nie je to problém, keďže sa počas odvodenia výsledných rovníc (3.2) a (3.3) eliminuje.

Oblak sa skladá z jedného typu identických častíc o hmotnosti m_C . Hustota oblaku je popísaná funkciou $\rho(x, t)$, kde x je vzdialenosť pozdĺž polpriamky, ktorá začína v strede oblaku a t je čas od začiatku rozpínania. Rozpínanie oblaku stačí simulovať na tejto polpriamke, pretože elementy interagujú vždy iba s najbližšími susedmi, a to prostredníctvom tlaku na hraniciach. Element v strede (na začiatku polpriamky) je statický. Okolité vákuum je simulované pomocou nehybného elementu, ktorého stred je veľmi ďaleko (10^6 cm), teda hustota a tlak v ňom sú minimálne. Schematický náčrt situácie je na obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Rozdelenie 1D oblaku na elementy

Na hranici elementov vzniká rozdiel tlakov Δp , ktorý vieme zistiť pomocou (3.1) a veľkostí susedných elementov dx_L a dx_R . Následne vieme určiť silu pôsobiacu v tomto mieste ako $F = p dS$. Potom zrýchlenie častíc na hranici elementov bude $a = F/dm$, kde $dm = m_C dN$. Spolu dostávame

$$a = \frac{kT}{m_C} \left(\frac{1}{dx_L} - \frac{1}{dx_R} \right). \tag{3.2}$$

Na základe (3.2) vieme modelovať pohyb hraníc elementov v čase t . Relatívna hustota oblaku voči počiatkovej hustote v oblasti hranice elementov bude

$$\rho_r(x, t) = \frac{dx_L(x, t = 0) + dx_R(x, t = 0)}{dx_L(x, t) + dx_R(x, t)}. \tag{3.3}$$

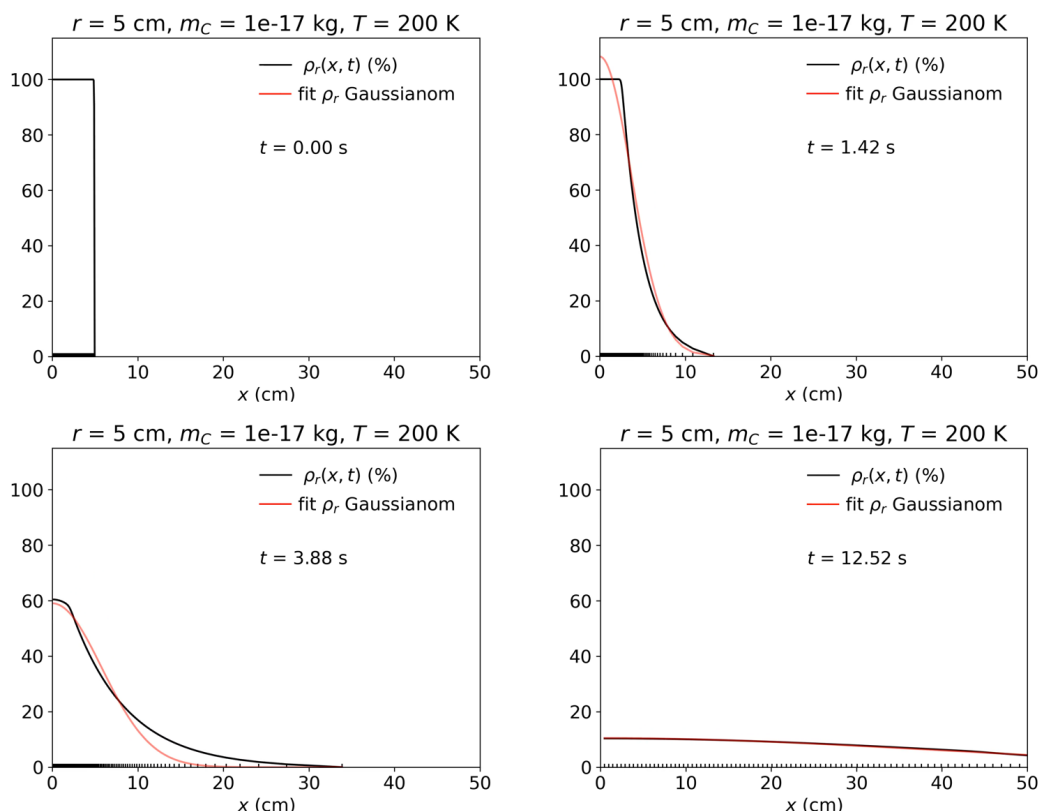
3.2 Simulácia

Na simulovanie sme využívali programovací jazyk Python 3.7 s knižnicami numpy, scipy, matplotlib, celluloid a ffmpeg. Náš kód je dostupný formou odkazu na GitHub v prílohe A.3. Súbor "README.md" popisuje detailnejšie úlohy jednotlivých súborov a narábanie s nimi.

Ako popisujeme v sekcii 3.1, stačí simulovať polovicu oblaku. Rozdelili sme ju na 100 elementov, a s časovým krokom $dt = 10^{-4}$ s sme prepočítavali polohy ich hraníc. Na začiatku boli hranice rozložené rovnomerne v oblasti $x \in [0, r]$, teda hustota bola homogénna. Každých 200 krokov bol vykreslený aktuálny stav do videa, na ktoré je odkaz v prílohe A.4. Na obrázku 3.2 je vybraných niekoľko snímok z tohto videa ako ukážka. Čierna krivka je $\rho_r(x, t)$ vypočítaná pomocou (3.3) a červená jej fit Gaussiánom

$$f_{\rho_r}(x, t) = A(t) \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma(t)^2}\right). \quad (3.4)$$

Parameter $A(t)$ je rovný fitovanej relatívnej hustote v strede oblaku v závislosti na čase, $A(t) = f_{\rho_r}(x = 0 \text{ cm}, t)$. Parameter σ popisuje šírku Gaussiánu. V oblasti $x \in [-5\sigma, 5\sigma]$ sa nachádza prakticky všetka (viac ako 99.999 %) hmota oblaku. Hodnota 5σ sa pohybuje o 4 rády nižšie ako umiestnenie krajného elementu pre potreby simulácie. Zvyšovanie vzdialenosti krajného elementu od stredu oblaku prinieslo zanedbateľné zmeny skúmaných veličín.



Obr. 3.2: Simulácia rozpínania 1D oblaku. Relatívna hustota ρ_r v závislosti na vzdialenosti od stredu oblaku x je zobrazená čiernou. Fit $\rho_r(x)$ Gaussiánom f_{ρ_r} je zobrazený červenou. Video dostupné v prílohe A.4.

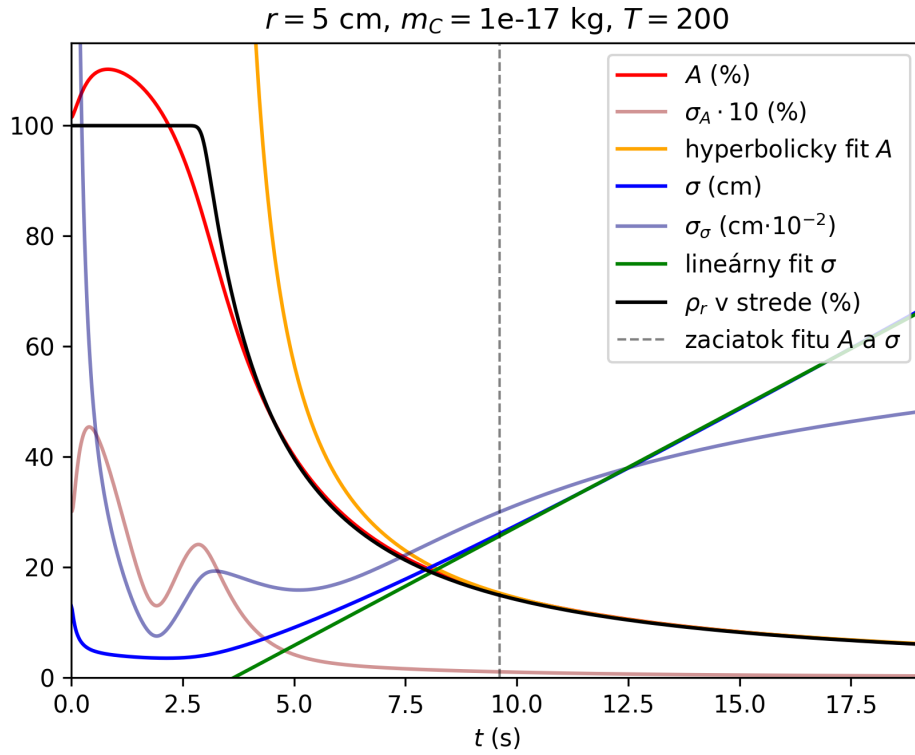
Vidíme, že zozáčiátku nie je fit najlepší, ale po istom čase hustota oblaku veľmi dobre spĺňa Gaussovský profil. Na grafe 3.3 je zobrazený vývoj parametrov Gaussiánu $A(t), \sigma(t)$ v čase a ich fit hyperbolou pre $A(t)$

$$f_A(t) = \frac{B}{t + C} \quad (3.5)$$

a priamkou pre $\sigma(t)$

$$f_\sigma(t) = D \cdot t + E. \quad (3.6)$$

Takisto sú na grafe 3.3 zobrazené chyby $\sigma_A(t), \sigma_\sigma(t)$ parametrov $A(t), \sigma(t)$. Chyba $\sigma_A(t)$ klesá k nule. Chyba $\sigma_\sigma(t)$ od istého momentu rastie, avšak to je spôsobené rastom parametra $\sigma(t)$, relatívne táto chyba klesá.

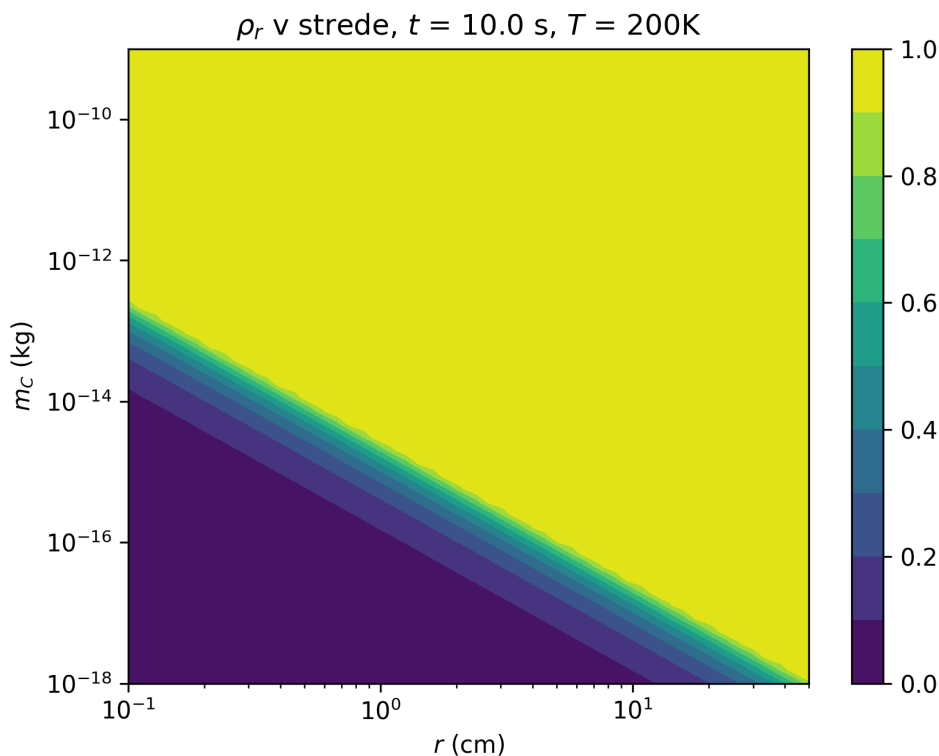


Obr. 3.3: Vývoj parametrov fitu profilu hustoty $\rho_r(x)$ Gaussiánom (3.4) v čase. $A(t)$ je fitovaná hyperbolou (3.5) a $\sigma(t)$ je fitovaná priamkou (3.6).

Fitovanie parametrov Gaussiánu $A(t), \sigma(t)$ prebiehalo v oblasti, kde Gaussián popisoval relatívnu hustotu $\rho_r(x, t)$ dostatočne dobre. Konkrétne bolo požadované, aby $\sigma_A < 0.001$, čo je v grafe 3.3 zobrazené prerušovanou zvislou čiarou. Hodnota 0.001 bola zvolená arbitrárne. Odporovali sme, že následne bol hyperbolický a lineárny fit dostatočne presný. Vďaka týmto fitom bolo možné extrapolovať hodnoty $A(t), \sigma(t)$ na časy po skončení simulácie, kedy dochádzalo k numerickým nestabilitám pri prekladaní $\rho_r(x, t)$ Gaussiánom (3.4).

Relatívne hustoty v strede oblaku po 10 sekundách $\rho_r(x = 0, t = 10 \text{ s})$ sme vyriesili do trojrozmerného (3D) farebného grafu 3.4 v závislosti na r a m_C . Obe osi

sú v logaritmickej škále a obsahujú 50 rovnomerne (logaritmicky) rozmiestnených oblakov. Časový vývoj tohoto grafu je dostupný v prílohe A.5.



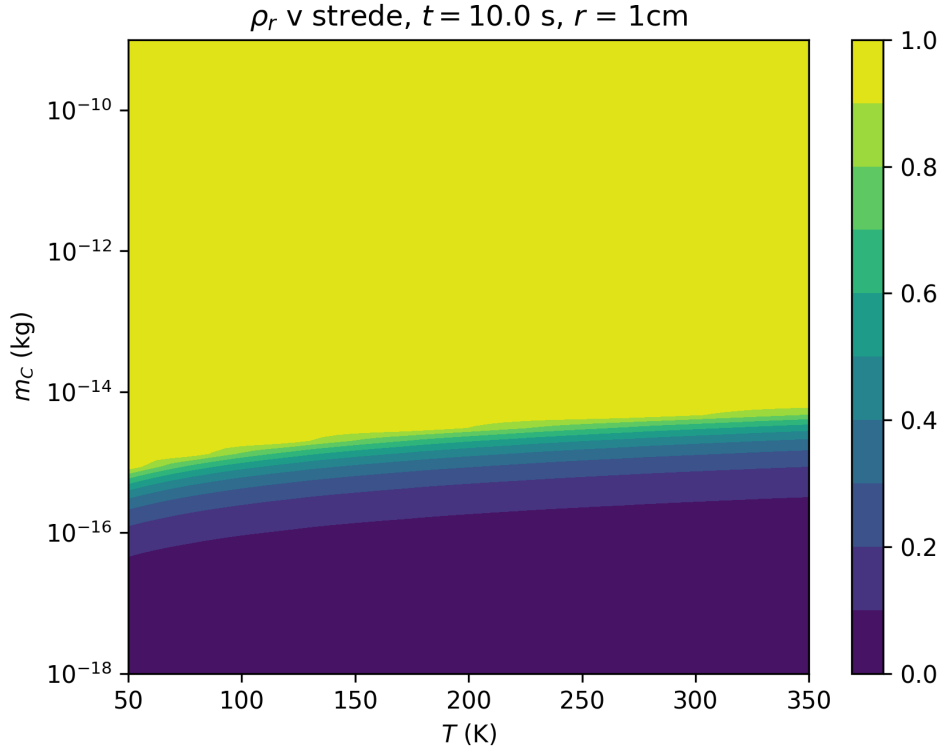
Obr. 3.4: Závislosť relatívnej hustoty oblaku v strede po 10 sekundách na počiatkovej pološírke oblaku r a hmotnosti častíc m_C pri konštantnej teplote $T = 200$ K. Animovaná verzia dostupná v prílohe A.5. Graf bol vytvorený na priestore 50×50 simulácií.

Graf 3.4 je generovaný pre $m_C \in [10^{-18} \text{ kg}, 10^{-9} \text{ kg}]$. Ťažšie častice už nie sú vhodné pre LMAO, pretože môžu byť potenciálnou hrozbou pre satelity. Ako sme písali v 1.1, medzi malý kozmický odpad zaraďujeme objekty o veľkosti menšej ako 1 mm, a takýto odpad je schopný opotrebovať povrch a prístroje satelitov. Ak uvažíme, že približná hustota prachových častíc je $\sim 2 \text{ g cm}^{-3}$ (Parnell et al. 1986), tak hmotnosť $m_C = 10^{-9} \text{ kg}$ odpovedá prachovej častici o veľkosti $\sim 0.1 \text{ mm}$. Väčšie (a hmotnejšie) častice už nepovažujeme relevantné pre LMAO.

Minimálna skúmaná hmotnosť prachových častíc m_C bola zvolená 10^{-18} kg , pretože pri menších m_C je oblak príliš nestabilný a jeho hustota rýchlo klesá na nulu. Preto nie je v LMAO možné, aby bol oblak tvorený plynom, keďže častice plynu (molekuly) majú hmotnosti v ráde $\sim 10^{-23} \text{ kg}$. Oblak tvorený plynom zmizne v zlomku sekundy.

Termodynamická teplota na LEO sa pohybuje v rozmedzí od -150 °C do 60 °C (Iles 2004). V prepočte na Kelvininy približne 100 K až 350 K. Teplota T , ktorá vstupovala ako parameter do simulácie je kinetická teplota prachových častíc, a je menšia ako termodynamická. V tejto práci sme neurčovali, aký je ich presný vzťah, hodnotu $T = 200 \text{ K}$ sme považovali za rozumný odhad.

Na grafe 3.5 sú vynesené relatívne hustoty v strede oblaku po 10 sekundách v závislosti na T a m_C . Teplota T je škálovaná lineárne v rozsahu od 50 K do 350 K. Hmotnosti m_C sú ako predtým škálované logaritmicky. Vidíme, že závislosť na teplote nie je výrazná, krivky rovnakých hustôt ρ_r stúpajú iba mierne oproti tomu ako klesajú na grafe 3.4. Preto arbitrárne zvolenie teploty na 200 K nespôsobí veľkú chybu v určení profilu hustoty oblaku (pokiaľ nebude skutočná teplota T rádovo iná).



Obr. 3.5: Závislosť relatívnej hustoty oblaku v strede po 10 sekundách na kinetickej teplote častíc T a hmotnosti častíc m_C pri konštantnej počiatkovej pološírke oblaku $r = 1$ cm. Animovaná verzia dostupná v prílohe A.6. Graf bol vytvorený na priestore 50×50 simulácií.

Z grafov 3.2 a 3.3 vidíme, že trvá nejaký čas, kým informácia o rozpínaní oblaku dorazí do jeho stredu. Ako hraničný čas $t = t_H$ definujeme najmenší čas, pre ktorý platí $\rho_r(x = 0, t = t_H) < 0.99$. V čase $t < t_H$ má oblak jednotkovú relatívnu hustotu až do istej vzdialenosti od stredu, kde nastáva jej zlom a strmý pokles. Ako hraničnú vzdialenosť $x = x_H$ definujeme najmenšiu vzdialenosť od stredu oblaku, pre ktorú platí $\rho_r(x = x_H, t) < 0.99$. Grafy znázorňujúce závislosti t_H a x_H sú v prílohe A.7, avšak pre naše ďalšie skúmanie nebudú potrebné.

3.3 Typy oblakov

Na základe farieb na grafoch 3.4 a 3.5 sme definovali 4 typy oblakov v skúmanom priestore parametrov r a m_C :

1. Homogénne – žltá oblasť. Stredová hustota týchto oblakov je stále 100%. Informácia o rozpínaní oblaku nestihla doraziť do jeho stredu. Takéto oblaky sa rozpínajú málo a zachovávajú si homogénny profil hustoty na intervale $x \in [0, x_H(t)]$ v čase $t < t_H$. Čím hlbšie sme v žltej oblasti, tým väčší je čas t_H .

2. Semiprechodové – zelená oblasť. Informácia o rozpínaní už stihla doraziť do stredu oblaku ($t > t_H$), takže stredová hustota klesla pod 100%. Avšak hustota týchto oblakov ešte nie je dobre popísaná Gaussovským profilom hustoty ($\sigma_A > 0.001$).

3. Prechodová oblasť – medzi fialovou a semiprechodovou oblasťou. Oblaky v tejto oblasti sa dajú dobre popísať Gaussovským rozložením hustoty (3.4). Ich parametre $A(t), \sigma(t)$ vieme predpovedať fitom ako na grafe 3.3.

4. Nepoužiteľná oblasť – fialová oblasť. Oblaky v tejto oblasti sa rozpínajú veľmi rýchlo, ich hustota sa blíži k nule v ráde sekúnd. Tieto oblaky sú nestabilné a nepoužiteľné pre LMAO.

V tejto práci sa ďalej zameriame na prechodové oblaky pre $T = 200$ K, teda tie, ktorých hustotu vieme modelovať Gausiánom. Avšak naša simulácia je schopná simulovať profil hustoty aj pre oblaky v ostatných oblastiach. V budúcnosti chceme na tom stavať a preskúmať oblaky v semi-prechodovej a homogénnej oblasti.

Oblaky v prechodovej oblasti zadefinujeme ako oblaky, pre ktoré je začiatok fitu parametrov Gausiánu A, σ (t. j. $\sigma_A < 0.001$) v čase menšom ako 10 s, ale zároveň $\rho_r(x = 0 \text{ cm}, t = 10 \text{ s}) > 0.05$. Do tejto oblasti patrí napríklad oblak z grafu 3.3.

Na grafe 3.6 je znázornená prechodová oblasť (čiernou farbou). Získali sme ju na základe grafu 3.4 a grafu v prílohe A.8, ktorý znázorňuje čas, v ktorom začal byť fit relatívnej hustoty Gausiánom dostatočne presný ($\sigma_A < 0.001$). V tomto čase sa začali fitovať parametre Gausiánu (A, σ) pomocou konštánt B, C, D, E . V bielej oblasti fit neprebehol, pretože oblak sa nedostal do Gaussovského tvaru.

Stred prechodovej oblasti sme získali pomocou lineárneho fitu v log log škále (dekadický logaritmus), teda funkciou

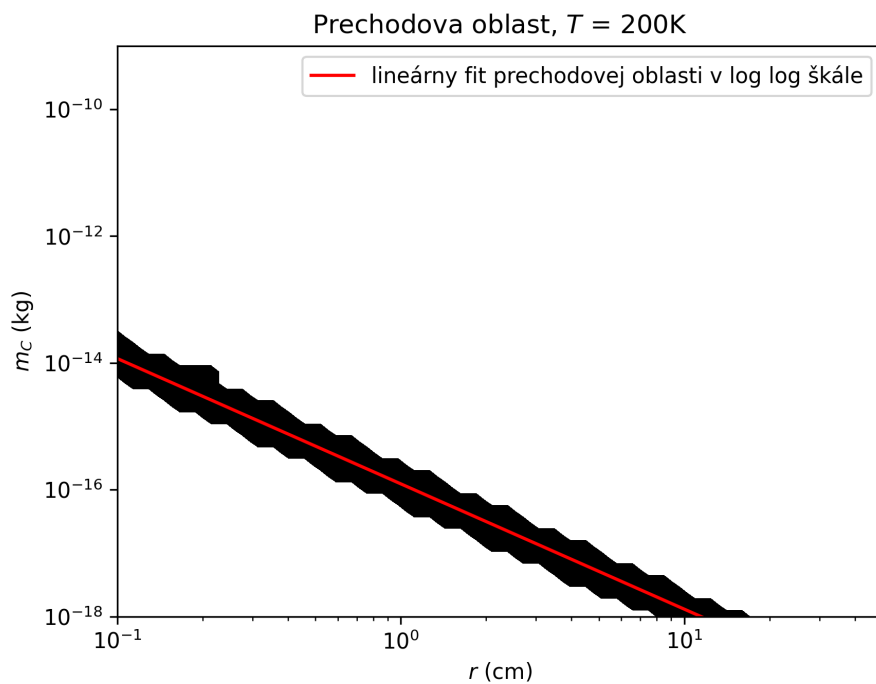
$$\log\left(\frac{r}{\text{cm}}\right) = P \cdot \log\left(\frac{m_C}{\text{kg}}\right) + Q. \quad (3.7)$$

Dostali sme

$$\begin{aligned} P &= (-0.492 \pm 0.007), \\ Q &= (-7.8 \pm 0.1). \end{aligned} \quad (3.8)$$

V nasledujúcich kapitolách sa budeme venovať oblakom, ktoré pri teplote $T = 200$ K spĺňajú rovnicu (3.7) po dosadení parametrov (3.8). Konkrétne, po odstránení logaritmov,

$$\boxed{\frac{r}{\text{cm}} = \left(\frac{m_C}{\text{kg}}\right)^{-0,492} \cdot 10^{-7,8}}. \quad (3.9)$$



Obr. 3.6: Prechodová oblasť (čierna). Platí pre ňu, že začiatok fitu A, σ je v čase menšom ako 10 s a zároveň $\rho_r(x = 0 \text{ cm}, t = 10 \text{ s}) > 0.05$. Červenou je znázornený lineárny fit v log log škále. Graf bol vytvorený na priestore 50×50 simulácií.

4. Fáza 2: Spomalenie odpadu pri prelete oblakom

Cieľom tejto kapitoly je spočítať zmenu rýchlosti odpadu Δv pri prelete prechodovým oblakom (ktorý ma Gaussovský profil hustoty). Budeme skúmať ako Δv závisí od presnosti, s ktorou trafíme odpad oblakom.

4.1 Teoretický model

Na odpad pri prelete skrz oblak pôsobí odporová sila (Batchelor 1967)

$$F_O(x, t = t_P) = \frac{1}{2} C_D S_D v^2 \rho_{3D}(x, t = t_P), \quad (4.1)$$

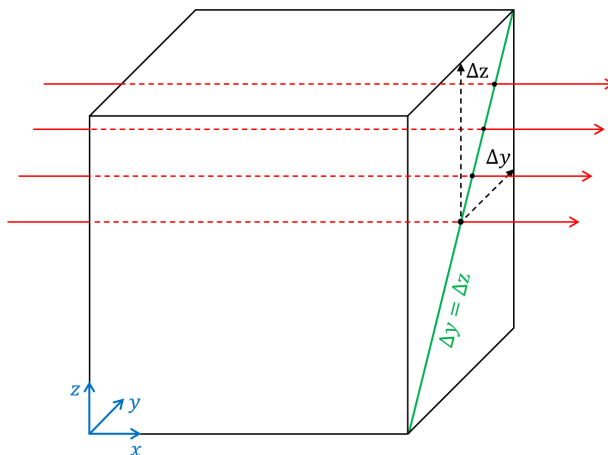
kde t_P je čas preletu od vzniku oblaku, C_D koeficient odporu odpadu, S_D plocha priečného prierezu odpadu, v relatívna rýchlosť odpadu pri prelete a ρ_{3D} trojrozmerná hustota oblaku v bode $[x, y, z]$.

Uvažujeme, že prelet odpadu oblakom je veľmi krátky, a teda sa počas neho rozloženie hustoty oblaku nezmenilo (A, σ sú konštantné). Tento predpoklad je relevantný, pretože odpad za sekundu preletí $\sim 10^4 \sigma$.

Ďalej uvažujeme, že priemer odpadu $D_D \ll \sigma$. Teda, že odpad je bodový a celý sa nachádza v približne rovnakej hustote ρ_{3D} . To znamená, že v danom mieste preletu pôsobí na celý povrch odpadu rovnaká odporová sila F_O . Tento predpoklad je splnený, ak si zvolíme dostatočne malý odpad.

Takisto uvažujeme, že zmena rýchlosti $\Delta v \ll v$. Vďaka tomu môžeme pre potreby výpočtu odporovej sily F_O považovať v za konštantné pri prelete oblakom. Tento predpoklad je oprávnený, pretože, ako bude ukázané v kapitole 6, pre LMAO je potrebné $\Delta v \sim 100 \text{ m s}^{-1}$, čo je o 2 rády menšie ako v .

Prelet odpadu skrz oblak modelujeme rovnobežne s osou x pre rôzne posunutia $\Delta y, \Delta z$ od stredu oblaku v smere osí y, z . Táto situácia je schematicky znázornená na obrázku 4.1, kde červenou šípkou je vyznačená dráha preletu odpadu. Pre jednoduchosť budeme predpokladať $\Delta y = \Delta z$.



Obr. 4.1: Schéma preletu odpadu skrz oblak.

Trojrozmernú hustotu oblaku ρ_{3D} v absolútnych jednotkách vypočítame pomocou počiatkovej hustoty a jednorozmerných relatívnych hustôt pozdĺž osí x, y, z

$$\rho_{3D}(x, t = t_P) = \rho_{3D}(x, t = 0 \text{ s}) \rho_{r,x}(x, t = t_P) \rho_{r,y}(y, t = t_P) \rho_{r,z}(z, t = t_P). \quad (4.2)$$

Profil hustoty pozdĺž osi x je Gaussián (3.4). Poloha odpadu sa v smere osí y a z nemení, preto ostávajú počas preletu hustoty $\rho_{r,y}, \rho_{r,z}$ konštantné. Konkrétne, keďže oblak modelujeme ako kocku, platí

$$\rho_{r,y} = \rho_r(x = \Delta y, t = t_P) = \rho_{r,z}. \quad (4.3)$$

Pre jednoduchosť ďalej označujeme $\rho_{r,x} \equiv \rho_r$.

Označme hmotnosť oblaku ako m . Po dosadení 3.4, 4.3 a

$$\rho_{3D}(x, t = 0 \text{ s}) = \frac{m}{(2r)^3} \quad (4.4)$$

do 4.2, a následnej úprave, dostávame

$$\rho_{3D}(x, t = t_P) = \frac{m}{(2r)^3} A(t = t_P)^3 \exp\left(-\frac{x^2 + 2\Delta y^2}{2\sigma(t = t_P)^2}\right). \quad (4.5)$$

Zmenu rýchlosti Δv pri prelete oblakom získame integrovaním zrýchlenia skrz oblak podľa času. Po zámene $dt = dx/v$ bude integrál na intervale $(-\infty, \infty)$. Nie je to v rozpore s predpokladom o rýchlom prelete, pretože okraje Gaussiánu sa blížia k nule, čím môžeme zanedbať ich odseknutie a integrovať napríklad na intervale $[-5\sigma, 5\sigma]$. Takýto interval preletí odpad za $\sim 10^{-3}$ s, čo je dostatočne malý čas v porovnaní s rýchlosťou rozpínania prechodových oblakov.

Využitím $F_O = m_D a$, kde m_D je hmotnosť odpadu, dostávame

$$\Delta v = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{F_O(x, t = t_P)}{m_D v} dx. \quad (4.6)$$

Po dosadení vzťahov (4.1) a (4.5) do (4.6), úprave a integrovaní získavame výsledný vzťah pre zmenu rýchlosti odpadu po prelete oblakom

$$\Delta v = \frac{C_D S_D v m}{16 m_D r^3} A(t = t_P)^3 \exp\left(-\frac{\Delta y^2}{\sigma(t = t_P)^2}\right) \sqrt{2\pi} \sigma(t = t_P). \quad (4.7)$$

4.2 Výpočet

Zmenu rýchlosti Δv skúmame pre oblaky v prechodovej oblasti pozdĺž krivky (3.9) pri teplote $T = 200$ K. Relevantné parametre sú hmotnosť častíc m_C , pričná vzdialenosť od x -ovej osi Δy , hmotnosť oblaku m , čas preletu odpadu od vzniku oblaku t_P , koeficient odporu C_D , plocha priečného prierezu odpadu S_D a relatívna rýchlosť odpadu a oblaku v . To je však príliš veľa parametrov, preto sme sa rozhodli odhadnúť niektoré z nich.

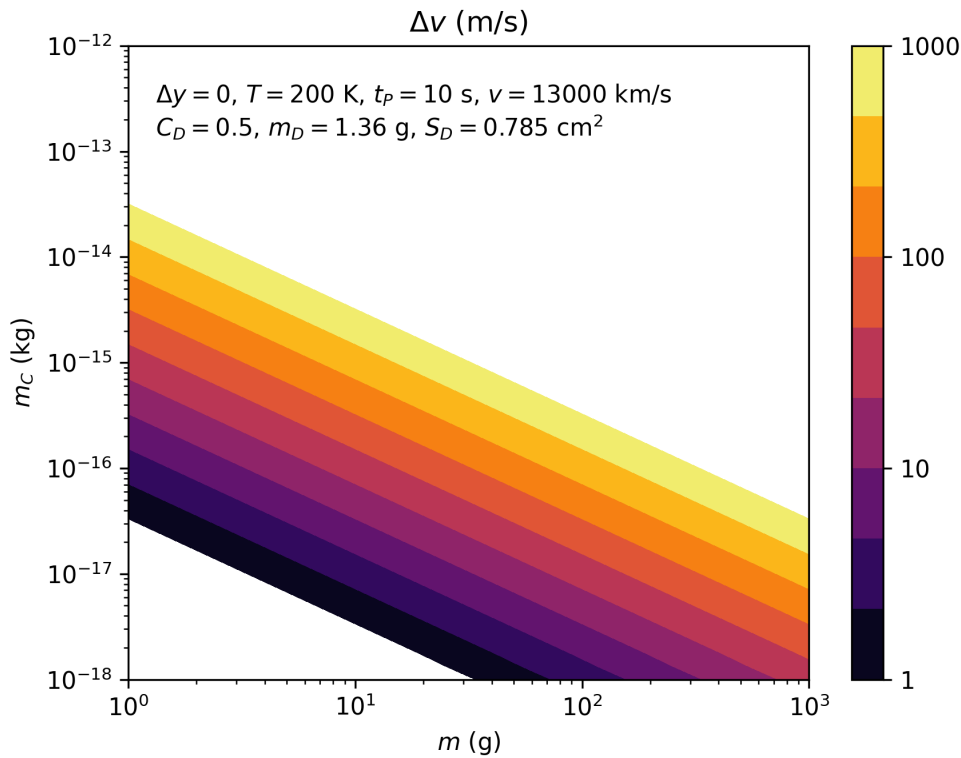
Uvažujeme kozmický odpad tvaru hliníkovej guľičky s priemerom $D_D = 1$ cm a hustotou $\rho_D = 2.6 \text{ g cm}^{-3}$ ¹. Potom $C_D = 0,5$ ¹, $m_D = 1.36$ g a $S_D = 0.785 \text{ cm}^2$.

¹Prevzaté 1.5.2023 z: <https://www.engineeringtoolbox.com>

Čas preletu oblakom od jeho vzniku položíme $t_P = 10$ s a relatívnu rýchlosť $v = 13 \text{ km s}^{-1}$ (ako sme spomínali v kapitole 2).

Po redukcii skúmaných parametrov nám zostali parametre $m_C, \Delta y, m$. Na grafe 4.2 je vynesená závislosť zmeny rýchlosti odpadu Δv na hmotnosti oblaku m a hmotnosti častíc m_C pri prelete stredom oblaku $\Delta y = 0$. Zmena rýchlosti Δv , hmotnosť oblaku m aj hmotnosť častíc m_C sú v logaritmicknej škále.

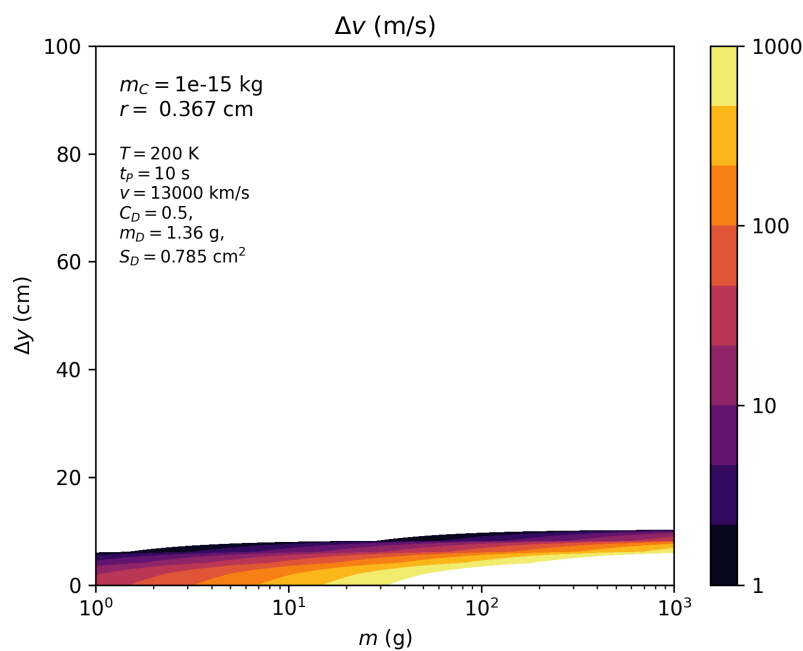
Zmenu rýchlosti Δv zobrazujeme v rozmedzí od 1 m s^{-1} do 1 km s^{-1} . Menšie rýchlosti sú pre LMAO príliš malé (čo rozoberieme v kapitole 6). Na grafe 4.2 sa nachádzajú v bielej oblasti, ktorá susedí s čiernym pruhom. Väčšie rýchlosti ako 1 km s^{-1} zase nespĺňajú podmienky aproximácie $\Delta v \ll v$ a $D_D \ll \sigma$. Na grafe 4.2 ich nájdeme v bielej oblasti, ktorá susedí so žltým pruhom.



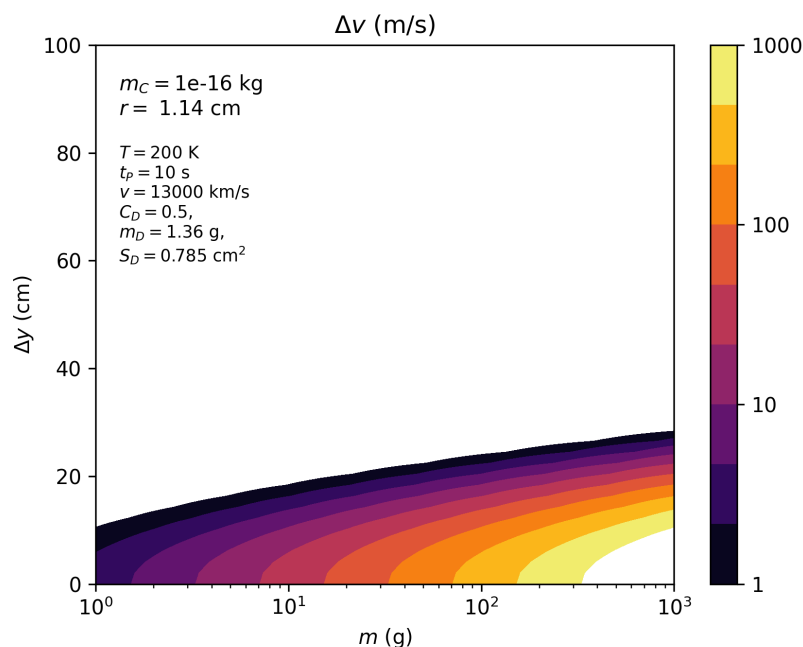
Obr. 4.2: Závislosť zmeny rýchlosti odpadu Δv na hmotnosti oblaku m a hmotnosti častíc m_C pri prelete stredom oblaku ($\Delta y = 0$). Hodnoty ďalších parametrov sú zobrazené v grafe. Graf bol vytvorený na priestore 50×50 simulácií.

Grafy 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 ukazujú závislosť zmeny rýchlosti odpadu Δv na hmotnosti oblaku m a vzdialenosti od stredu Δy pri prelete oblakom obsahujúcim častice o hmotnosti $m_C = 10^{-15} \text{ kg}, 10^{-16} \text{ kg}, 10^{-17} \text{ kg}, 10^{-18} \text{ kg}$. Rýchlosti sme opäť vykreslovali v rozmedzí od 1 m s^{-1} do 1 km s^{-1} . Rovnako ako na grafe 4.2, biela oblasť susediaca s čiernym pruhom obsahuje menšie rýchlosti ako 1 m s^{-1} a biela oblasť susediaca so žltým pruhom obsahuje väčšie rýchlosti ako 1 m s^{-1} .

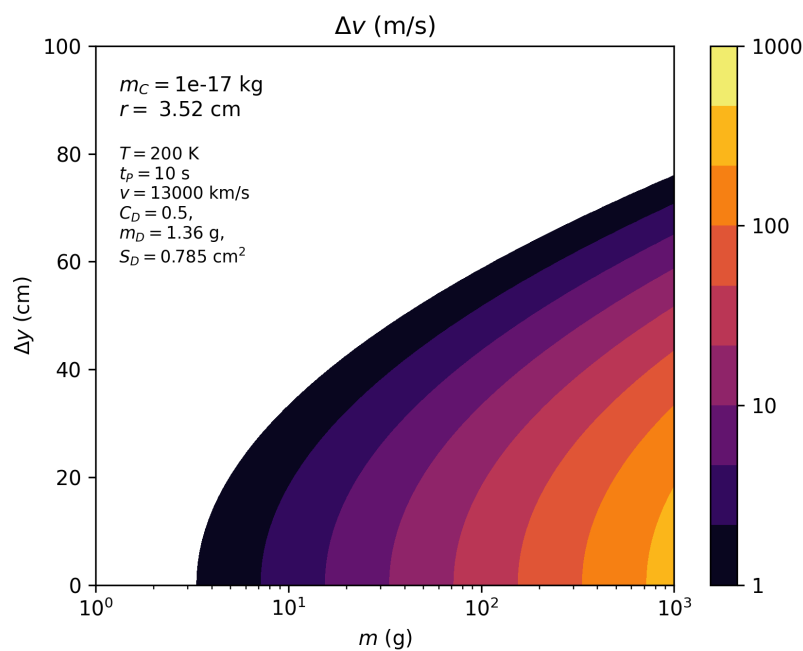
Všimnime si, že prechodové oblaky obsahujúce hmotné častice (napr. graf 4.3) sú pri strete s odpadom malé, teda je ťažké odpad trafiť. Oproti tomu prechodovým oblakom obsahujúcim málo hmotné častice (napr. graf 4.6) je ľahké trafiť odpad, avšak Δv je menšie.



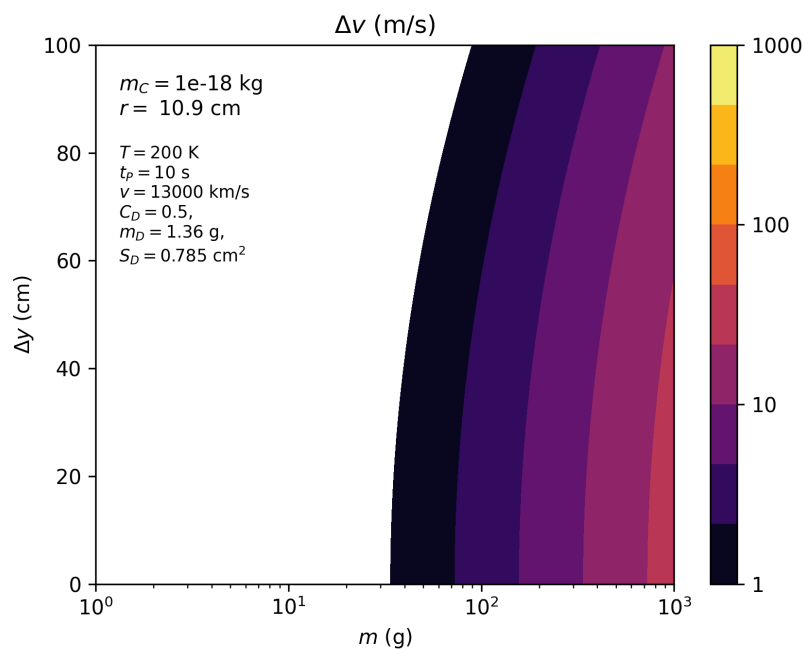
Obr. 4.3: Závislosť zmeny rýchlosti odpadu Δv na hmotnosti oblaku m a vzdialenosti od stredu Δy pri prelete oblakom obsahujúcim častice o hmotnosti $m_C = 10^{-15}$ kg. Hodnoty ďalších parametrov sú zobrazené v grafe. Graf bol vytvorený na priestore 50×50 simulácií.



Obr. 4.4: Závislosť zmeny rýchlosti odpadu Δv na hmotnosti oblaku m a vzdialenosti od stredu Δy pri prelete oblakom obsahujúcim častice o hmotnosti $m_C = 10^{-16}$ kg. Hodnoty ďalších parametrov sú zobrazené v grafe. Graf bol vytvorený na priestore 50×50 simulácií.



Obr. 4.5: Závislosť zmeny rýchlosti odpadu Δv na hmotnosti oblaku m a vzdialenosti od stredu Δy pri prelete oblakom obsahujúcim častice o hmotnosti $m_C = 10^{-17}$ kg. Hodnoty ďalších parametrov sú zobrazené v grafe. Graf bol vytvorený na priestore 50×50 simulácií.



Obr. 4.6: Závislosť zmeny rýchlosti odpadu Δv na hmotnosti oblaku m a vzdialenosti od stredu Δy pri prelete oblakom obsahujúcim častice o hmotnosti $m_C = 10^{-18}$ kg. Hodnoty ďalších parametrov sú zobrazené v grafe. Graf bol vytvorený na priestore 50×50 simulácií.

5. Fáza 3: Zhorenie odpadu v atmosfére

Cieľom tejto kapitoly je určiť veľkú poloos a , excentricitu e novej dráhy odpadu po prelete oblakom, ako aj dobu života odpadu t_Z , v závislosti na zmene rýchlosti Δv určeného v kapitole 4. Takisto určíme minimálnu zmenu rýchlosti potrebnú na zníženie doby života odpadu na hodnotu menšiu ako 25 rokov.

5.1 Teoretický model

Prepokladajme, že odpad obieha na kruhovej dráhe vo výške h nad povrchom Zeme. Jeho rýchlosť je (Logsdon 1997)

$$v_D = \sqrt{\frac{GM_\oplus}{R_\oplus + h}}, \quad (5.1)$$

kde G je gravitačná konštanta, M_\oplus hmotnosť Zeme a R_\oplus polomer Zeme.

Po prelete oblakom rýchlosť odpadu klesne o Δv , čo spôsobí priblíženie perigea k povrchu Zeme a zvýšenie excentricity dráhy. Z Vis-vivy (Logsdon 1997) máme

$$(v_D - \Delta v)^2 = GM_\oplus \left(\frac{2}{R_\oplus + h} - \frac{1}{a} \right), \quad (5.2)$$

kde a je veľká poloos novej dráhy. Úpravou vyjadríme veľkú poloos

$$a = \frac{GM_\oplus}{v_D^2 - 2v_D\Delta v + \Delta v^2} = \frac{GM_\oplus}{\frac{GM_\oplus}{R_\oplus + h} - 2\sqrt{\frac{GM_\oplus}{R_\oplus + h}}\Delta v + \Delta v^2}. \quad (5.3)$$

Z vlastností elipsy vypočítame excentricitu ako

$$e = \frac{h}{a} - 1. \quad (5.4)$$

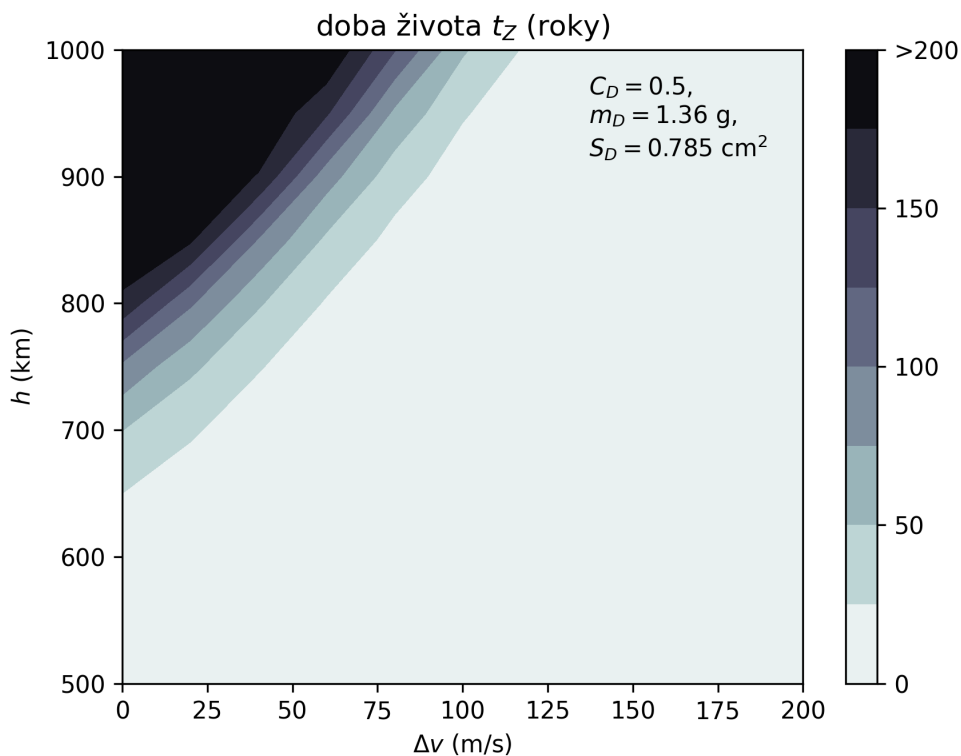
5.2 Simulácia

Na určenie doby života odpadu z parametrov jeho dráhy (5.3) a (5.4) sme využili externý program ORBITM¹ s modelom "Sam". Tento program je určený na udržiavanie satelitov na obežnej dráhe a dokáže simulovať odpor atmosféry Zeme na rôzne objekty. Využíva "U.S. Standard Atmosphere 1976 model" a jeho použitie je do 1000 km.

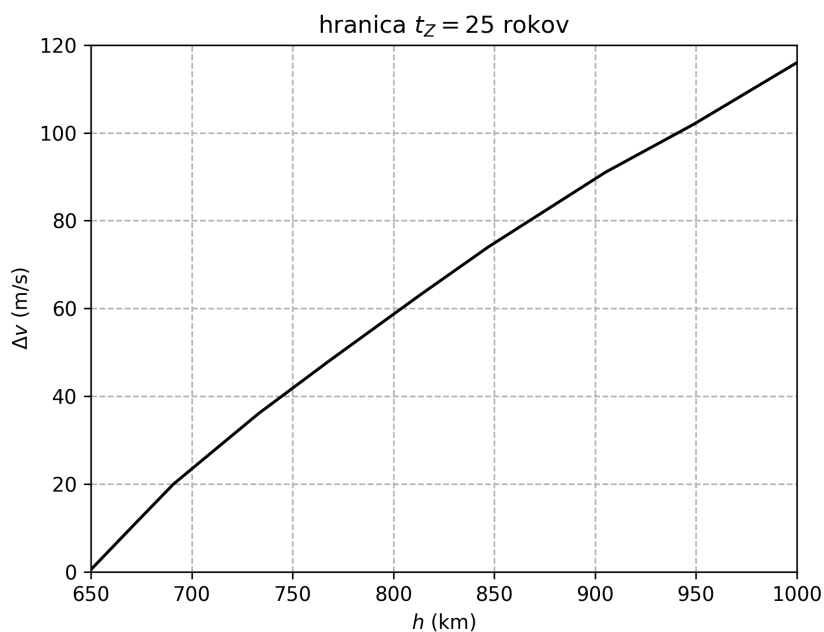
Na grafe 5.1 je zobrazená doba života odpadu t_Z v závislosti na zmene rýchlosti Δv a počiatočnej výške nad povrchom Zeme h (uvažujeme nulovú inklináciu a kruhovú dráhu pred spomalením pomocou LMAO). Graf je vykreslený pre maximálne doby života $t_Z = 200$ rokov, kvôli simulačnému limitu modelu "Sam".

Na grafe 5.2 je zobrazené minimálne spomalenie odpadu Δv v závislosti na jeho počiatočnej výške h tak, aby doba života klesla pod 25 rokov.

¹Autor: Samuel Y. W. Low, 2021, GitHub: <https://github.com/sammmlow/ORBITM>



Obr. 5.1: Závislosť doby života odpadu t_z v rokoch na zmene rýchlosti Δv a počiatkovej výške odpadu h . Parametre odpadu sú zobrazené v grafe. Graf bol vytvorený na priestore 11×11 simulácií.



Obr. 5.2: Závislosť potrebnej zmeny rýchlosti odpadu Δv na jeho počiatkovej výške h tak, aby sa dosiahla doba života $t_z = 25$ rokov.

6. Diskusia

Oblaky prachových častíc sme simulovali ako kocku, ktorú sme rozdelili na elementy a uvažovali, že každý element spĺňa stavovú rovnicu ideálneho plynu, pričom elementy si nevedeli vymieňať častice. Oblaku sme priradili kinetickú teplotu častíc T , ktorá určovala tlak na steny elementov. V budúcnosti by sme sa chceli venovať simulovaniu realistickejšieho tvaru oblaku, ako je napríklad valec. Takýto oblak by vznikol krátkym sprejovaním z kruhového otvoru s malým divergenčným uhlom. Takisto by sme chceli preskúmať vzťah kinetickej teploty častíc T , s ktorou počíta náš model a reálnej termodynamickkej teploty na orbite.

V práci sme sa zamerali na oblaky v prechodovej oblasti, ktorú sme definovali pomocou začiatku fitu A, σ a stredovej hustoty. Naším cieľom bolo vymedziť oblasť, kde oblaky dobre spĺňajú Gaussovský profil hustoty, ale zároveň nie sú príliš rozopnuté.

Všimnime si, že prechodová oblasť zobrazená na grafe 3.6 je posunutá smerom ku fialovej oblasti na grafe 3.4 a 3.5. Dôvod prečo je tomu tak sa dá odpozorovať zo série grafov 3.2. Najskôr sa počas doby t_H šíri informácia o rozpínaní od okraja oblaku do jeho stredu. Vtedy sa oblak nachádza v žltej (homogénnej) oblasti, pretože jeho relatívna stredová hustota je 100 %. Následne začne stredová hustota klesať, kedy oblak prechádza zeleným pásom (na grafe 3.4 a 3.5). Avšak v týchto fázach nie je hustota oblaku dobre popísateľná Gausiánom, čo môžeme vidieť na treťom z grafov na obrázku 3.2. Štvrtý graf už zobrazuje prechodový oblak. Vidíme, že Gausián sa zhoduje s reálnym profilom hustoty a zároveň stredová hustota je väčšia ako 5 %.

V budúcnosti by sme sa chceli venovať homogénnym a semiprechodovým oblakom. Výhodou oblakov v homogénnej oblasti je, že sa menej rozpínajú, takže sa väčšia časť prachových častíc využije na spomalenie odpadu. To však iba za predpokladu, že sa nám podarí odpad trafiť. Menšie rozpínanie znamená menšiu veľkosť oblaku, takže pravdepodobne budeme musieť nazačiatku vyslať elementy oblaku s nenulovou priečnou rýchlosťou. Na to by bolo potrebné upraviť našu simuláciu rozpínania oblaku. Vieme však potom umelo regulovať veľkosť oblaku v momente stretu s odpadom.

Dobrym kompromisom by mohli byť semiprechodové oblaky, pretože sa dostatočne rozpínajú aj sami. Ich hustota však neodpovedá Gausiánu, preto bude potrebné numericky integrovať prelet daným profilom hustoty namiesto analytického výpočtu. Takisto, semiprechodové oblaky sú všeobecne menšie ako prechodové, teda môže byť narušená podmienka $D_D \ll \sigma$, čo bude taktiež potrebné zahrnúť do simulácie preletu. V neposlednom rade, numerickou integráciou vieme odstrániť aj podmienku $\Delta v \ll v$, a upresniť výpočet Δv ešte viac.

Prejdime ďalej ku zmene rýchlosti Δv a dobe života t_Z odpadu. V sekcii 1.2 sme na základe grafu A.2 určili, že doba života hliníkovej guľičky na kruhovej orbite s priemerom 1 cm je menšia ako 25 rokov do výšky 620 km až 840 km. Kruhová dráha odpovedá zmene rýchlosti $\Delta v = 0$, takže z grafu 5.2 vieme odčítať, že podmienka $t_Z < 25$ rokov je splnená do výšky 650 km, čo je v stanovenom intervale.

Výška 650 km je na spodnej hranici intervalu (620 km až 840 km), čo znamená, že model "Sam", ktorý sme používali nadhodnocuje dobu života, a teda v realite

by malo stačiť menšie zmenšenie rýchlosti ako sme určili na grafoch 5.1 a 5.2.

Ďalej je dôležité poznamenať, že ako odpad uvažujeme hliníkovú guľičku s koeficientom odporu $C_D = 0.5$. Avšak reálny odpad má viac nepravidelný tvar a vyšší koeficient odporu. Napríklad štvorcový tenký plát natočený kolmo k smeru pohybu má $C_D = 1.17$ ¹, čo je viac ako dvojnásobok. To potom spôsobuje väčšie brzdenie v atmosfére aj v oblaku. Naše výsledky potrebnej Δv pre LMAO sú teda horným odhadom voči realite.

Ako sme písali v kapitole 2, LMAO sa zameriava na odpad vo výške 900 km až 1000 km. Z grafu 5.2 vidíme, že potrebná zmena rýchlosti odpadu Δv na to, aby sme zredukovali jeho dobu života pod 25 rokov je približne $\sim 100 \text{ m s}^{-1}$. To vieme porovnať s grafmi v kapitole 4 a určiť vhodnú hmotnosť častíc m_C pre LMAO.

Na základe grafu 4.6 zisťujeme, že pre častice o hmotnosti 10^{-18} kg nie je reálne dosiahnuť takéto spomalenie odpadu, respektíve potrebovali by sme oblak o hmotnosti vyše 1 kg. To však považujeme za príliš neefektívne na odstránenie jedného odpadu o hmotnosti 0.35 g. Na druhú stranu z grafu 4.3 vidíme, že ak by sme chceli použiť častice o hmotnosti 10^{-15} kg , tak potrebujeme presnosť traťovania odpadu oblakom v ráde jednotiek centimetrov. Takáto presnosť je však dosť nerealistická.

Myslíme si, že ideálna hmotnosť častíc pre LMAO je 10^{-16} kg , čo odpovedá prachovým časticiam o priemere $\sim 0.5 \mu\text{m}$. Pre tie potrebujeme presnosť $\sim 10 \text{ cm}$, čo by mohlo byť v najbližšej dobe technologicky dosiahnuteľné. Na požadované spomalenie $\sim 100 \text{ m s}^{-1}$, na základe grafu 4.4, potrebujeme oblak o hmotnosti od 30 g do 90 g. Tak by každý LMAOSAT so zásobou 100 kg prachových častíc vedel z orbity odstrániť viac ako 1000 kusov odpadu.

Navyše, v realistickejšom prípade kozmického odpadu nepravidelného tvaru s väčším koeficientom odporu sa zmenšuje potrebná hmotnosť oblaku vďaka väčšej odporovej sile oblaku aj atmosféry. V budúcnosti sa plánujeme venovať viacerým veľkostiam a tvarom kozmického odpadu, ako aj upresniť simuláciu preletu oblakom a brzdenia v atmosfére.

¹Prevzaté 1.5.2023 z: <https://www.engineeringtoolbox.com>

Záver

Problém narastajúceho počtu kozmického odpadu na orbite plánujeme riešiť aktívnym odstraňovaním pomocou lokálneho aerodynamického odporu (LMAO). Koncept je založený na vytvorení oblaku prachových častíc vo vesmíre a jeho následný stret s kusom odpadu vo vysokej relatívnej rýchlosti $v \approx 13 \text{ km s}^{-1}$. Prelet oblakom spomalí odpad natolko, že zhorí v atmosfére Zeme v prijateľnom čase, t. j. za menej ako 25 rokov.

Oblak sme modelovali ako kocku, pričom sme jeho rozpínanie rozložili na tri jednorozmerné rozpínania. V čase $t = 0$ mal oblak pološírku r , hmotnosť m a obsahoval homogénne rozložené častice o hmotnosti m_C . Vytvorili sme simuláciu, ktorá predpovedá profil relatívnej hustoty oblaku v čase t pre zvolené parametre oblaku r, m_C a kinetickú teplotu častíc T . Kód prikladáme v prílohe A.3 ako odkaz na GitHub.

Kvôli vysokej relatívnej rýchlosti oblaku a odpadu je čas medzi vznikom oblaku a preletom odpadu cez oblak v ráde sekúnd až desiatok sekúnd. Pre ďalšie skúmanie sme zvolili čas preletu $t_P = 10 \text{ s}$. Vývoj relatívnej stredovej hustoty oblaku nie je príliš závislý na kinetickej teplote častíc. Jej hodnotu sme zvolili $T = 200 \text{ K}$.

Zistili sme, že relatívnu hustotu oblakov splňujúcich podmienku

$$\frac{r}{\text{cm}} = \left(\frac{m_C}{\text{kg}} \right)^{-0,492} \cdot 10^{-7,8}$$

vieme po čase t_P dobre popísať Gaussiánom. Takéto oblaky nazývame prechodové a vo zvyšku práce sme sa venovali práve im.

Ďalej sme sa zamerali na prelet konkrétneho kozmického odpadu skrz prechodový oblak, a to na hliníkovú guľičku s priemerom 1 cm. Vypočítali sme jej zmenu rýchlosti Δv po prelete oblakom v závislosti na presnosti trafenia stredu oblaku Δy , hmotnosti oblaku m a hmotnosti častíc m_C .

Následne sme zistili, že vo výškach 900 km až 1000 km je doba života hliníkovej guľičky na kruhovej dráhe v ráde stoviek rokov. Ukázali sme, že na jej skrátenie pod 25 rokov je potrebné zmenšiť rýchlosť guľičky o $\sim 100 \text{ m s}^{-1}$.

Na základe potrebnej Δv a závislostiam Δv na $\Delta y, m$ a m_C sme ako vhodnú hmotnosť častíc pre LMAO určili $m_C = 10^{-16} \text{ kg}$. Požadovaná presnosť preletu odpadu od stredu oblaku je v tomto prípade $\sim 10 \text{ cm}$. To znamená potrebu upresnenia polohy odpadu priamo vo vesmíre, napríklad pomocou laserového skeneru, či infračervenej kamery. Technologickú stránku LMAO (respektíve konkrétny návrh satelitu či misie) sme však podrobnejšie v tejto práci neskúmali.

Nakoniec sme zistili, že na požadované spomalenie danej hliníkovej guľičky je potrebný oblak prachových častíc o hmotnosti 30 g až 90 g. Takto by vedel satelit so zásobou 100 kg prachových častíc odstrániť vyše 1000 kusov kozmického odpadu.

Avšak v skutočnosti má kozmický odpad nepravidelný tvar, ktorý zvyšuje jeho koeficient odporu. Vedie to k väčšiemu spomaleniu pri prelete oblakom a intenzívnejšiemu brzdeniu atmosférou. Dôsledkom je menšia potrebná hmotnosť oblaku a viac odstráneného odpadu z orbity.

V budúcnosti by sme sa chceli venovať vylepšeniu modelu oblaku z kocky na valec a venovať sa profilom hustoty, ktoré nie sú Gaussovské. Ďalej máme v pláne numericky integrovať prelet odpadu oblakom, čím upresníme výpočet zmeny rýchlosti Δv . Takisto by sme chceli použiť lepší model na simuláciu brzdzenia odpadu v atmosfére a určovanie jeho doby života. Nakoniec plánujeme preskúmať prelety kozmického odpadu rôznych veľkostí, tvarov cez oblak.

Bibliografia

- [1] National Research Council. *Orbital Debris: A Technical Assessment*. Washington, DC: The National Academies Press, 1995. DOI: <https://doi.org/10.17226/4765>.
- [2] ESA. *ESA'S Annual Space Environment Report*. 2022.
- [3] Donald J. Kessler a Burton G. Cour-Palais. „Collision frequency of artificial satellites: The creation of a debris belt“. In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 83.A6 (1978), s. 2637–2646. DOI: <https://doi.org/10.1029/JA083iA06p02637>.
- [4] C. Priyant Mark a Surekha Kamath. „Review of Active Space Debris Removal Methods“. In: *Space Policy* 47 (2019), s. 194–206. ISSN: 0265-9646. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2018.12.005>.
- [5] Leonard Vance a Allan Mense. „Value analysis for orbital debris removal“. In: *Advances in Space Research* 52 (aug. 2013), s. 685–695. DOI: [10.1016/j.asr.2013.04.024](https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.04.024).
- [6] Herbert B. Callen. *Thermodynamics and Introduction to Thermostatistics (Second Edition)*. John Wiley & Sons, 1985.
- [7] Calvin B. Parnell et al. „Physical Properties of Five Grain Dust Types“. In: *Environmental Health Perspectives* 66 (1986), s. 183–188. URL: <http://www.jstor.org/stable/3430234>.
- [8] Peter A. Iles. „Photovoltaic Conversion: Space Applications“. In: *Encyclopedia of Energy*. Ed. Cutler J. Cleveland. New York: Elsevier, 2004, s. 25–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00332-6>.
- [9] G. K. Batchelor. *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press, 1967.
- [10] T. Logsdon. *Orbital Mechanics: Theory and Applications*. A Wiley interscience publication. Wiley, 1997. ISBN: 9780471146360.

Zoznam obrázkov

1.1	Vývoj počtu objektov väčších ako 10 cm na obežnej dráhe Zeme podľa ich orbity (ESA 2022). Definície skratiek v legende sú uvedené v prílohe A.1.	4
1.2	Predpoveď počtu objektov nad 10 cm na LEO v najbližších 200 rokoch. Červená krivka znázorňuje extrapolovanú situáciu pri súčasnom trende vypúšťania satelitov. Čierna krivka znázorňuje hypotetickú situáciu, ak by už neboli žiadne ďalšie štarty do vesmíru (ESA 2022)	4
3.1	Rozdelenie 1D oblaku na elementy	7
3.2	Simulácia rozpínania 1D oblaku. Relatívna hustota ρ_r v závislosti na vzdialenosti od stredu oblaku x je zobrazená čiernou. Fit $\rho_r(x)$ Gaussiánom f_{ρ_r} je zobrazený červenou. Video dostupné v prílohe A.4.	8
3.3	Vývoj parametrov fitu profilu hustoty $\rho_r(x)$ Gaussiánom (3.4) v čase. $A(t)$ je fitovaná hyperbolou (3.5) a $\sigma(t)$ je fitovaná priamkou (3.6).	9
3.4	Závislosť relatívnej hustoty oblaku v strede po 10 sekundách na počiatocnej pološírke oblaku r a hmotnosti častíc m_C pri konštantnej teplote $T = 200$ K. Animovaná verzia dostupná v prílohe A.5. Graf bol vytvorený na priestore 50×50 simulácií.	10
3.5	Závislosť relatívnej hustoty oblaku v strede po 10 sekundách na kinetickej teplote častíc T a hmotnosti častíc m_C pri konštantnej počiatocnej pološírke oblaku $r = 1$ cm. Animovaná verzia dostupná v prílohe A.6. Graf bol vytvorený na priestore 50×50 simulácií.	11
3.6	Prechodová oblasť (čierna). Platí pre ňu, že začiatok fitu A, σ je v čase menšom ako 10 s a zároveň $\rho_r(x = 0 \text{ cm}, t = 10 \text{ s}) > 0.05$. Červenou je znázornený lineárny fit v log log škále. Graf bol vytvorený na priestore 50×50 simulácií.	13
4.1	Schéma preletu odpadu skrz oblak.	14
4.2	Závislosť zmeny rýchlosti odpadu Δv na hmotnosti oblaku m a hmotnosti častíc m_C pri prelete stredom oblaku ($\Delta y = 0$). Hodnoty ďalších parametrov sú zobrazené v grafe. Graf bol vytvorený na priestore 50×50 simulácií.	16
4.3	Závislosť zmeny rýchlosti odpadu Δv na hmotnosti oblaku m a vzdialenosti od stredu Δy pri prelete oblakom obsahujúcim častice o hmotnosti $m_C = 10^{-15}$ kg. Hodnoty ďalších parametrov sú zobrazené v grafe. Graf bol vytvorený na priestore 50×50 simulácií.	17
4.4	Závislosť zmeny rýchlosti odpadu Δv na hmotnosti oblaku m a vzdialenosti od stredu Δy pri prelete oblakom obsahujúcim častice o hmotnosti $m_C = 10^{-16}$ kg. Hodnoty ďalších parametrov sú zobrazené v grafe. Graf bol vytvorený na priestore 50×50 simulácií.	17

4.5	Závislosť zmeny rýchlosti odpadu Δv na hmotnosti oblaku m a vzdialenosti od stredu Δy pri prelete oblakom obsahujúcim častice o hmotnosti $m_C = 10^{-17}$ kg. Hodnoty ďalších parametrov sú zobrazené v grafe. Graf bol vytvorený na priestore 50×50 simulácií.	18
4.6	Závislosť zmeny rýchlosti odpadu Δv na hmotnosti oblaku m a vzdialenosti od stredu Δy pri prelete oblakom obsahujúcim častice o hmotnosti $m_C = 10^{-18}$ kg. Hodnoty ďalších parametrov sú zobrazené v grafe. Graf bol vytvorený na priestore 50×50 simulácií.	18
5.1	Závislosť doby života odpadu t_Z v rokoch na zmene rýchlosti Δv a počiatkovej výške odpadu h . Parametre odpadu sú zobrazené v grafe. Graf bol vytvorený na priestore 11×11 simulácií.	20
5.2	Závislosť potrebnej zmeny rýchlosti odpadu Δv na jeho počiatkovej výške h tak, aby sa dosiahla doba života $t_Z = 25$ rokov.	20
A.1	Závislosť doby života objektu na obežnej dráhe na jeho počiatkovej výške nad povrchom (National Research Council 1995).	31
A.2	Hraničný čas t_H pre stred oblaku ($x = 0$ cm) a hraničná poloha x_H pre $t = 30$ s. Čas t_H je najmenší čas, kedy platí $\rho_r(x = 0 \text{ cm}, t = t_H) < 0.99$. Vzdialenosť x_H je najmenšia vzdialenosť, kedy platí $\rho_r(x = x_H, t = 30 \text{ s}) < 0.99$. Polohy x_H sú vykreslené v logaritmickej škále. Graf bol vytvorený na priestore 50×50 simulácií.	33
A.3	Hraničný čas t_H pre stred oblaku ($x = 0$ cm) zobrazený v logaritmickej škále. Oblasti $t_H > 30$ s sú určené z fitu $x_H(t)$. Čas t_H je najmenší čas, kedy platí $\rho_r(x = 0 \text{ cm}, t = t_H) < 0.99$. Graf bol vytvorený na priestore 50×50 simulácií.	34
A.4	Čas, v ktorom je fit hustoty Gaussiánom dostatočne relevantný, a začíname fitovať parametre Gaussiánu (A, σ) v čase. V bielych miestach fit neprebehol. Graf bol vytvorený na priestore 50×50 simulácií.	35

Zoznam tabuliek

A.1	Definície a popisy zemských orbít (ESA 2022).	30
-----	-------------------------------------------------------	----

Zoznam použitých skratiek

ESA European Space Agency

LEO Low Earth Orbit

LMAO Lokálna metóda aerodynamického odporu

LMAOSAT Satelit využívajúci LMAO na odstraňovanie kozmického odpadu

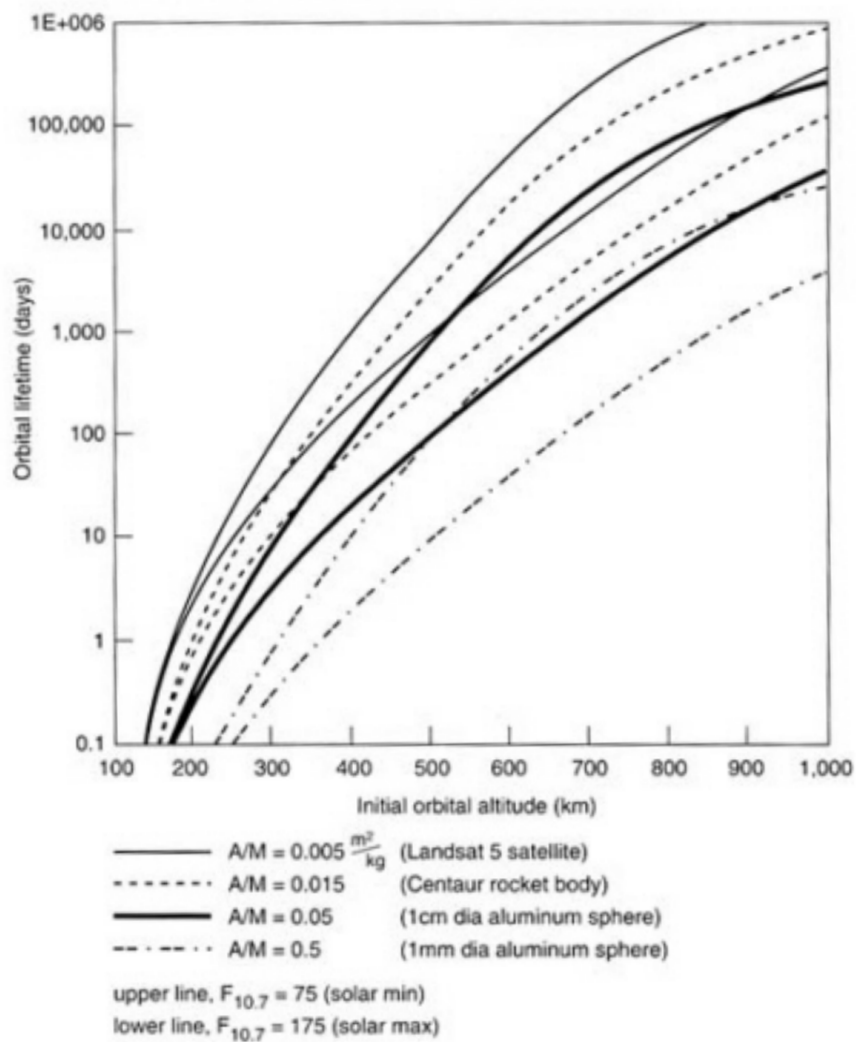
A. Prílohy

A.1

Orbit	Description	Definition		
GEO	Geostationary Orbit	$i \in [0, 25]$	$h_p \in [35586, 35986]$	$h_a \in [35586, 35986]$
IGO	Inclined Geosynchronous Orbit	$a \in [37948, 46380]$	$e \in [0.00, 0.25]$	$i \in [25, 180]$
EGO	Extended Geostationary Orbit	$a \in [37948, 46380]$	$e \in [0.00, 0.25]$	$i \in [0, 25]$
NSO	Navigation Satellites Orbit	$i \in [50, 70]$	$h_p \in [18100, 24300]$	$h_a \in [18100, 24300]$
GTO	GEO Transfer Orbit	$i \in [0, 90]$	$h_p \in [0, 2000]$	$h_a \in [31570, 40002]$
MEO	Medium Earth Orbit	$h_p \in [2000, 31570]$	$h_a \in [2000, 31570]$	
GHO	GEO-superGEO Crossing Orbits	$h_p \in [31570, 40002]$	$h_a > 40002$	
LEO	Low Earth Orbit	$h_p \in [0, 2000]$	$h_a \in [0, 2000]$	
HAO	High Altitude Earth Orbit	$h_p > 40002$	$h_a > 40002$	
MGO	MEO-GEO Crossing Orbits	$h_p \in [2000, 31570]$	$h_a \in [31570, 40002]$	
HEO	Highly Eccentric Earth Orbit	$h_p \in [0, 31570]$	$h_a > 40002$	
LMO	LEO-MEO Crossing Orbits	$h_p \in [0, 2000]$	$h_a \in [2000, 31570]$	
UFO	Undefined Orbit			
ESO	Escape Orbits			

Tabuľka A.1: Definície a popisy zemských orbít (ESA 2022).

A.2



Obr. A.1: Závislosť doby života objektu na obežnej dráhe na jeho počiatocnej výške nad povrchom (National Research Council 1995).

A.3

<https://github.com/ralako/LMA0>

Náš kód v Pythone na simulácie a kreslenie grafov použitých v tejto práci.

A.4

<https://youtu.be/lxS1qzGmYhg>

Odkaz na animovanú simuláciu relatívnej hustoty oblaku v čase. Je zachytená ako sekvencia grafov na obrázku 3.2.

A.5

<https://youtu.be/jNpeQwatADY>

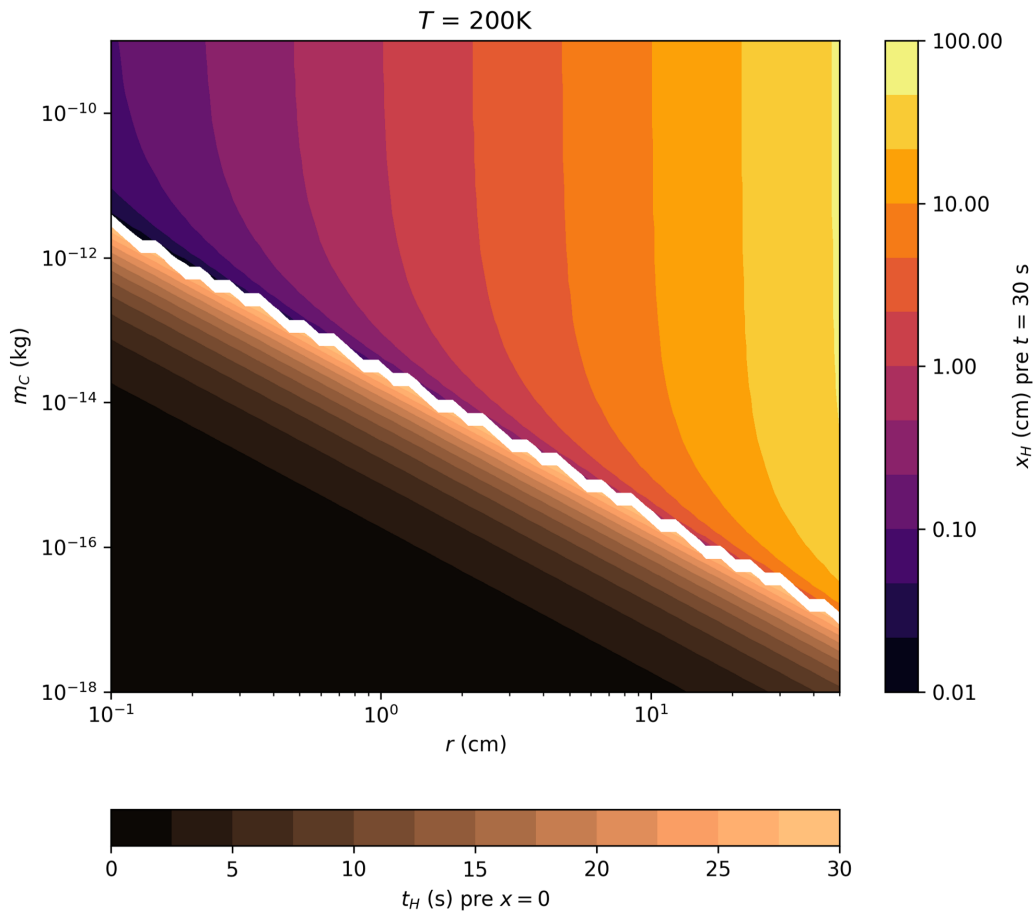
Odkaz na animovanú závislosť relatívnej hustoty v strede oblaku na čase pri konštantnej teplote. Graf 3.4 zobrazuje túto závislosť pre čas 10 s.

A.6

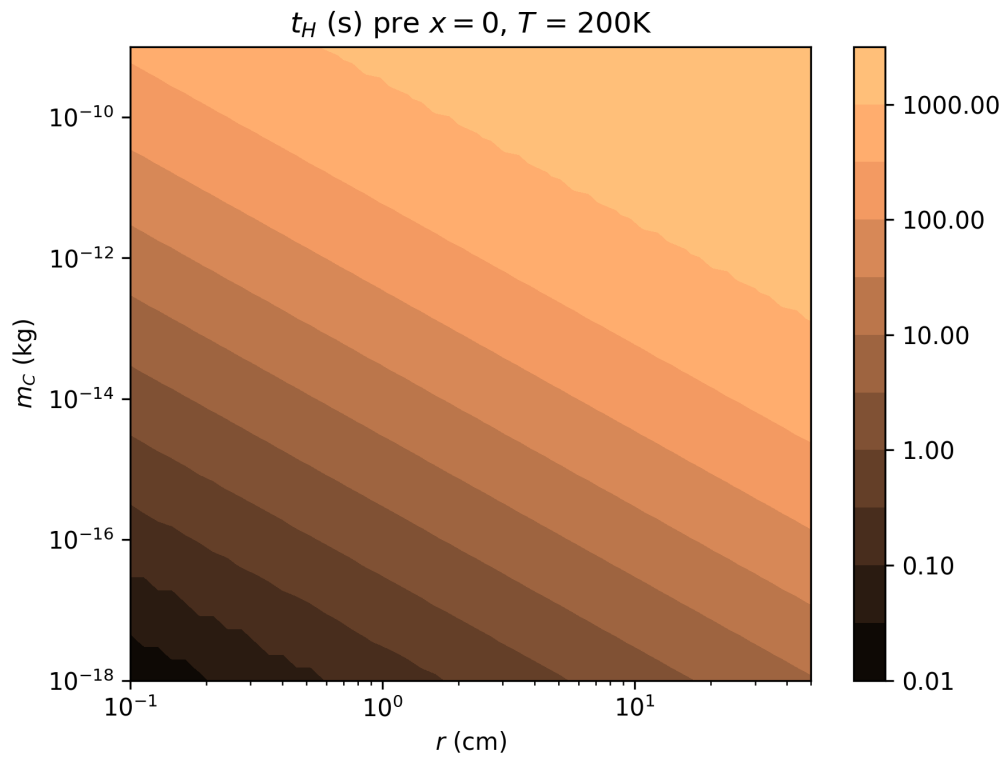
https://youtu.be/Gy1mz5d1_gI

Odkaz na animovanú závislosť relatívnej hustoty v strede oblaku na čase pri konštantnej počiatkovej pološírke. Graf 3.5 zobrazuje túto závislosť pre čas 10 s.

A.7

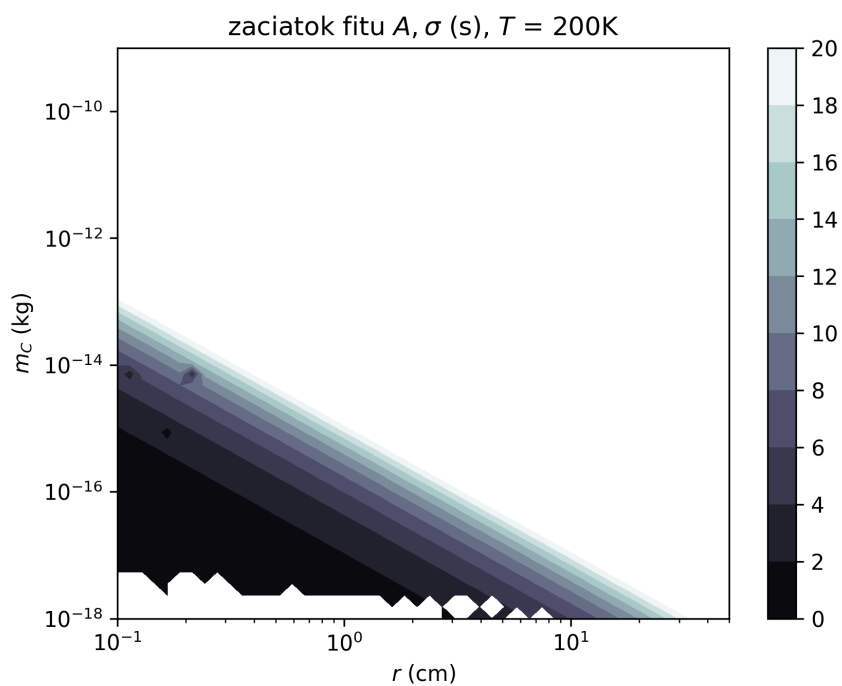


Obr. A.2: Hraničný čas t_H pre stred oblaku ($x = 0$ cm) a hraničná poloha x_H pre $t = 30$ s. Čas t_H je najmenší čas, kedy platí $\rho_r(x = 0 \text{ cm}, t = t_H) < 0.99$. Vzďialenosť x_H je najmenšia vzďialenosť, kedy platí $\rho_r(x = x_H, t = 30 \text{ s}) < 0.99$. Polohy x_H sú vykreslené v logaritmickej škále. Graf bol vytvorený na priestore 50×50 simulácií.



Obr. A.3: Hraničný čas t_H pre stred oblaku ($x = 0$ cm) zobrazený v logaritmickej škále. Oblasti $t_H > 30$ s sú určené z fitu $x_H(t)$. Čas t_H je najmenší čas, kedy platí $\rho_r(x = 0 \text{ cm}, t = t_H) < 0.99$. Graf bol vytvorený na priestore 50×50 simulácií.

A.8



Obr. A.4: Čas, v ktorom je fit hustoty Gaussiánom dostatočne relevantný, a začíname fitovať parametre Gaussiánu (A, σ) v čase. V bielych miestach fit neprebehlo. Graf bol vytvorený na priestore 50×50 simulácií.